



**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**

**Entwicklung einer Methodik für eine
modellbasierte und ganzheitliche
Fehleranalyse**

Bergische Universität Wuppertal

Fakultät 7 - Maschinenbau und Sicherheitstechnik

Arbeit zur Erlangung des akademischen
Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

vorgelegt von

Ovidiu Bielefeld

aus Hermannstadt

Tag der Einreichung: 25.05.2020

Tag der mündlichen Prüfung: 10.12.2020

Fachgebiet Produktsicherheit und Qualität

Bergische Universität Wuppertal

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Petra Winzer (Universität Wuppertal)
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche (Universität Stuttgart)
Drittgutachter: PD Dr.-Ing. habil. Nadine Schlüter (Universität Wuppertal)

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20210106-162037-3

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3A468-20210106-162037-3>]

DOI: 10.25926/s3ne-nc15

[<https://doi.org/10.25926/s3ne-nc15>]

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, Ovidiu Bielefeld, dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Titel „**Entwicklung einer Methodik für eine modellbasierte und ganzheitliche Fehleranalyse**“ selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und alle wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen als solche gekennzeichnet habe.

Die Dissertation ist bisher keiner anderen Universität vorgelegt worden. Ich erkläre, dass ich kein Promotionsverfahren erfolglos beendet habe und dass eine Aberkennung eines bereits erworbenen Doktorgrades nicht vorliegt.

Ort, Datum

Wuppertal, den 16. Dezember 2020

Unterschrift

Ovidiu Bielefeld

Zusammenfassung

Aktuelle Rückrufaktionen wie bspw. in der Automobilindustrie zeigen, dass derzeit eine einheitliche Fehlerbeschreibung sowie eine ganzheitliche Betrachtung von potentiellen Fehlern in der Nutzungsphase bei der Entwicklung von Produkten fehlen. Zudem führen solche Fehler, die erst – im schlimmsten Fall – in der Nutzungsphase identifiziert werden, zu sehr hohen Fehlerkosten und Imageschäden für das Unternehmen.

Diese wissenschaftliche Lücke der fehlenden, ganzheitlichen Betrachtung von potentiellen Fehlern in den frühen Phasen der Produktentwicklung kann zudem auch zur Gefährdung von Menschenleben bis hin zu Todesfällen führen.

Um potentielle Fehler in der Nutzungsphase bereits in der Produktentwicklung ganzheitlich zu identifizieren und einheitlich zu beschreiben, ist eine umfassende Untersuchung erforderlich. Dabei werden die folgenden Forschungsschwerpunkte untersucht: Fehlerdefinitionen und deren Klassifizierungen (Forschungsfeld 1 und 3), Methoden der Fehleranalyse in der Produktentwicklung (Forschungsfeld 4) und Ansätze zur Modellierung technischer Produktsysteme (Forschungsfeld 2).

Letzteres ist von großer Bedeutung, da durch die Modellierung nicht nur das technische Produkt, sondern auch seine Interaktion mit der Umwelt ganzheitlich analysiert werden kann. Dies bildet die Basis für die ganzheitliche und modellbasierte Fehleranalyse von potentiellen Fehlern in der Nutzungsphase. Zudem sind diese Forschungsfelder miteinander zu verzahnen und in Form einer neuen Methodik weiter zu entwickeln. In der vorliegenden Arbeit wird diese Methodik der modellbasierten und ganzheitlichen Fehleranalyse (MemogaFa) vorgestellt, die eine präventive Fehleridentifikation fördert.

Die neue Methodik wurde an zwei Fallbeispielen der Industrie evaluiert. Es zeigte sich, dass Expertenwissen und -erfahrungen zur Bestimmung kritischer, potentieller Nutzungsprozesse systematisch und rückverfolgbar in die frühen Phasen der Produktentwicklung integriert werden konnten. Durch die Nutzung der MemogaFa wurde das Verständnis hinsichtlich mechatronischer, komplexer Produkte erhöht und potentielle Fehlernetze mittels Szenarien und unter der Einbeziehung von relevanten Faktoren (Effekte, Ereignisse und Umwelt) analysiert.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Tool ermöglicht erstmalig, Fehler auf unterschiedlichen Ebenen (vom Groben zum Detail) und in Wechselwirkung mit relevanten Faktoren (Effekte, Umwelt, usw.) systematisch und ganzheitlich zu identifizieren sowie zu beschreiben.

Hierdurch wird die Erfüllung vom Produkthaftungsgesetz anhand einer präventiven Identifizierung potentieller Fehler, die zu Personenschaden führen können, erhöht.

Abstract

Current product recalls, for example in the automobile industry, show that there is still no standard failure specification and no holistic consideration of potential failures in the use phase of product development. In addition, such failures, which are only - in the worst-case - identified during the usage phase, lead to very high failure costs and damage to the company's reputation.

This scientific gap of the missing, holistic analysis of potential failures in the early phases of product development can also lead to endangerment of human life and even death. A comprehensive investigation is necessary to ensure that a holistic and uniform description of potential faults and their identification in the use phase can be implemented as early as the product development phase. This investigation should include the following main fields of research: Failure definitions and their classifications (research fields 1 and 3), methods of failure analysis in product development (research field 4) and approaches to modeling technical product systems (research field 3). The latter is of great importance since the modeling allows not only the technical product but also its interaction with the environment to be analyzed holistically.

This forms the basis for the holistic and model-based failure analysis of potential failures in the usage phase. In addition, these research fields must be interlinked and a new methodology further developed. This work introduces this methodology of model-based and holistic Failure Analysis (ger. "MemogaFa"), which promotes preventive Failure Identification.

The new methodology was evaluated using two industry case studies. It was found that expert knowledge and experience for determining critical, potential usage processes could be systematically and traceably integrated into the early phases of product development. The increased understanding of mechatronic, complex products as a result of the MemogaFa as well as the inclusion of other relevant factors such as effects, events and the environment are analyzed using scenarios and potential failure nets.

The tool developed as part of this work makes it possible for the first time to identify and describe failures systematically and holistically at different levels (from rough to detail) and in interaction with relevant factors (effects, environment, etc.). This will increase compliance with product liability laws through preventive identification of potential defects that can lead to human injury.

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei jenen Menschen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Dissertation unterstützt und motiviert haben.

Mein besonderer Dank gilt zuerst meiner Doktormutter, Frau Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Petra Winzer. Ohne ihre konstruktive Kritik, die unermüdliche Unterstützung sowie die umfassende und verlässliche Betreuung, wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Ich danke ihr auch dafür, dass sie an meine Fähigkeiten geglaubt hat, selbst dann, als ich daran gezweifelt habe. Ebenso danke ich Frau PD Dr.-Ing. habil. Nadine Schlüter, die mich wesentlich gefördert, motiviert und unterstützt hat und jederzeit für wertvolle Ratschläge und wissenschaftliche Diskussionen für mich da war. Zutiefst erfreut war ich, als ich erfahren habe, dass Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche, die zweite Gutachtung übernimmt, dafür bin ich sehr dankbar. Danken möchte ich auch Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uli Barth für die Übernahme des Vorsitzes und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manuel Löwer für den Beisitz in der Prüfungskommission.

Großer Dank auch an das Team des Fachgebiets Produktsicherheit und Qualität. Ich möchte mich vor allem bei Frau Martina Gorka und Frau Gabriele Seider bedanken, die für die Organisation und das Korrekturlesen mir ihre wertvolle Zeit geschenkt haben. Außerdem bedanke ich mich, neben den oben genannten, bei dem gesamten Team für das konstruktive Feedback aus wissenschaftlichen Diskussionen, Veröffentlichungen und Präsentationen. Das Team besteht aus den Mitarbeitern Amirbabak Ansari, Marius Heinrichsmeyer, Amelie Karcher, Tim Katzwinkel, David Kessing, Marian Mistler, Franz Wieck und die wissenschaftlichen und studentischen Hilfskräfte Christian Böhmer, Fynn Kösling, Insa Lemke, Bastian Walter und Carolin Wiehoff. Ich bin stolz seit 2012 ein Teil dieses Teams zu sein, und bedanke mich herzlich für den Zusammenhalt und das angenehme, familiäre und einzigartige Arbeitsklima.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meiner Familie, Freunden und Bekannten, die auf viele gemeinsamen Stunden mit mir verzichten mussten.

Vielen Dank an euch alle!

Wuppertal, den 16. Dezember 2020

Ovidiu Bielefeld

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XIII
Abkürzungsverzeichnis	XV
Vokabularium der verwendeten Fachbegriffe	XVI
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	2
1.2 Zielsetzung	5
1.3 Herangehensweise und Struktur der Arbeit.....	6
2 Theoretische Grundlagen und Stand der Technik	9
2.1 Produktentwicklung und Fehlerbegriff	9
2.1.1 Fehler.....	10
2.1.1.1 Fehlerdefinitionen.....	10
2.1.1.2 Fehlerarten und Fehlerklassifizierung.....	15
2.1.2 Zwischenfazit.....	19
2.2 Modelle, Ansätze zur Modellierung und Regeln	20
2.2.1 Vom allgemeinen zum spezifischen Modell eines Systems	20
2.2.2 Auswahl eines Ansatzes zur Modellierung von Fehlern in der Produktentwicklung...	23
2.2.3 Spezifische Systemelemente, Relationen und Attribuierungen für das Modell der neuen Methodik.....	28
2.2.4 Regeln der Modellierung	34
2.2.5 Zwischenfazit.....	36
2.3 Fehlerbeschreibung und Informationen.....	37
2.3.1 Fehlerbeschreibung und Informationen auf grober Ebene	37
2.3.2 Fehlerbeschreibung und Informationen auf detaillierter Ebene	38
2.3.3 Zwischenfazit.....	39
2.4 Analyse der Methoden der Fehleranalyse in der Produktentwicklung.....	40

2.4.1	FMEA	42
2.4.2	Ishikawa (Ursache-Wirkungs-Diagramm)	42
2.4.3	Fehlerbaumanalyse (FTA), Ereignisbaumanalyse (ETA) und Bow-Tie Methode.....	43
2.4.4	RBD (Reliability block diagram)	44
2.4.5	Markov-Modell.....	44
2.4.6	Zusammenfassung der Anforderungen aus den Methoden der Fehleranalyse	45
2.5	Zwischenfazit und die Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik	48
3	Entwicklung der Methodik für eine modellbasierte und ganzheitliche Fehleranalyse	50
3.1	Herleitung und Beschreibung der Schritte der Methodik für eine modellbasierte und ganzheitliche Fehleranalyse.....	50
3.1.1	Phase A: Modellbasierte Bereitstellung der Informationen für die Fehleranalyse und Fehlerbeschreibung.....	52
3.1.2	Phase B: Ganzheitliche Fehleranalyse (Vom Groben zum Detail)	68
3.2	Zwischenfazit	82
4	Anwendung der Methodik für eine modellbasierte und ganzheitliche Fehleranalyse	84
4.1	Beispiel am Projekt K-VEC.....	84
4.2	Beispiel am DFG-Projekt Q-ELF	100
4.3	Bewertung der entwickelten Methodik anhand von Anforderungen	113
5	Fazit und Ausblick	117
6	Literaturverzeichnis.....	127
Anhang	140

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	"Prüfstufe, bei der der Fehler seine Wirkung zeigt" [in Anlehnung an Masing 2014, S. 588]..	1
Abbildung 2:	Interaktion des Systems mit seiner Umwelt [in Anlehnung an Hitchins 2007, S 71]	2
Abbildung 3:	Schematisches Beispiel einer Vernetzung zwischen einer Komponenten- und Funktionsstruktur [Eigene Darstellung].....	4
Abbildung 4:	Darstellung der Vorgehensweise und der Forschungsfelder im Zusammenhang.....	7
Abbildung 5:	Product Life Cycle [in Anlehnung an Spath et al. 2000; Bertsche 2004; Kamiske 2013; VDI 4003:2007] mit Subprozessen der Entwicklung [VDI 4003:2007, S. 28]	9
Abbildung 6:	Zusammenhang zwischen Root cause, Fault und Failure [in Anlehnung an ISO 26262-1, S. 3]	13
Abbildung 7:	Beschreibung einer Fehlerentstehung als zeitliche Abfolge anhand der Begriffe Abweichung, Fehler, Störung und Schaden [in Anlehnung an Westkämper 1997 und Ellouze 2010, S.6]	13
Abbildung 8:	Ursache und Wirkung Zusammenhänge, dargestellt als Funktion [in Anlehnung an Zingel 2013, S. 50].....	14
Abbildung 9:	Ganzheitliche Beschreibung einer Fehlerentstehung [eigene Darstellung in Anlehnung an Westkämper 1997, Zingel 2013, S. 50]	15
Abbildung 10:	Art des Auftretens von Fehlern [in Anlehnung an Badke-Schaub et al. 2012, S. 49].....	17
Abbildung 11:	Angepasstes Systemmodell für eine ganzheitliche Fehleranalyse [Eigene Darstellung]	21
Abbildung 12:	Zusammenhang zwischen dem generischen Modell, den Domänen und dem (domänen-spezifischen) System [in Anlehnung an Bursac 2016, S. 115]	22
Abbildung 13:	Notwendige Bestandteile eines Modells [in Anlehnung an Häuslein 2004, S.29]	22
Abbildung 14:	DeCoDe-Hauptmatrix mit den vier DeCoDe-Sichten [in Anlehnung an Winzer et al. 2011 und Ott 2009]	25
Abbildung 15:	Die drei Arten der Matrizen innerhalb der DeCoDe-Hauptmatrix [Eigene Darstellung in Anlehnung an Winzer et al. 2011 und Ott 2009].....	26
Abbildung 16:	Axiomatic Design [in Anlehnung an Suh 1998].....	29
Abbildung 17:	Beschreibung eines Systemelements [in Anlehnung an Sage und Rouse 1999, S. 437]	29
Abbildung 18:	Funktionsbeschreibung am Beispiel eines Antriebsstrangs für ein Gelenk [in Anlehnung an Brudniok 2007, S. 187]	30
Abbildung 19:	Beschreibung der Relationen zwischen den DeCoDe-Sichten [in Anlehnung an Schlund 2011, S. 75]	31
Abbildung 20:	Prinzipdarstellung einer Komponentenhierarchie abgebildet in einer Matrix [Eigene Darstellung].....	31
Abbildung 21:	Möglichkeiten der Beschreibung der Relationen innerhalb der Komponenten-Sicht/ physikalische Domäne [Eigene Darstellung in Anlehnung an Breidert 2007, S. 37 und Feldhusen et al. 2013, S. 41].....	32
Abbildung 22:	Möglichkeiten der Modellierung von Relationen innerhalb der physikalischen Domäne (Komponenten-Sicht) [Eigene Darstellung]	33
Abbildung 23:	Ordnungsbeziehung [in Anlehnung an Echterhoff 2016, S. 11]	34

Abbildung 24: Formale Ontologie für die Komponentenhierarchie [in Anlehnung an Schmalenbach 2013, S. 105]	35
Abbildung 25: Ganzheitliche Beschreibung einer Fehlerentstehung [eigene Darstellung in Anlehnung an Westkämper 1997; Zingel 2013, S. 50]	38
Abbildung 26: Zuordnung der Methoden zum PLC [in Anlehnung an Spath et al. 2000; Bertsche 2004; Kamiske 2013; VDI 4003:2007]	40
Abbildung 27: Herleitung der Phasen zur Entwicklung der MemogaFa [eigene Darstellung]	52
Abbildung 28: Die drei Faktoren zur Beschreibung eines Systemmodells [in Anlehnung an Echterhoff 2016, S. 36]	56
Abbildung 29: Transformation einer Funktionsstruktur in eine Produktstruktur [in Anlehnung an Feldhusen et al. 2013, S. 256]	57
Abbildung 30: Erstellung einer Domain Structure Matrix (DSM) als Matrix (links) und Graph (rechts) in der Software LOOME0 [Darstellung aus der Software LOOME0]	59
Abbildung 31: Abbildung einer Multi-Domain Matrix (MDM) nach den DeCoDe-Prinzipen in der Software LOOME0 (links Darstellung aus der Software LOOME0, rechts in Anlehnungen an [Schlund 2011])	60
Abbildung 32: Beispiel eines modellierten PSM (links) und die Nutzung der Umgebungsfunktion/ Fokusfunktion (rechts) [Prinzipdarstellung aus der Software LOOME0]	60
Abbildung 33: Quadranten der Wechselwirkungen mit Eingangsinformationen für die einfache und erweiterte Modellierung [Eigene Darstellung]	62
Abbildung 34: EMV - Beeinflussungsmodell [in Anlehnung an Kampker et al. 2013]	65
Abbildung 35: Ausgefüllte Quadranten der Wechselwirkungen [Eigene Darstellung]	67
Abbildung 36: Zusammenhang zwischen dem Nutzungsprozess und Szenarien [Eigene Darstellung, in Anlehnung an Gausemaier und Fink 1999]	68
Abbildung 37: Bildung der Fehlernetze anhand Szenarien [Eigene Darstellung]	70
Abbildung 38: Vorgehen für die Entwicklung des Tools zur ganzheitlichen Fehlerbeschreibung [eigene Darstellung]	72
Abbildung 39: VBA-Excel basiertes Tool zur ganzheitlichen Fehlerbeschreibung (Version 1.3)	73
Abbildung 40: Erster Bereich des VBA-Excel basierten Tools zur ganzheitlichen Fehlerbeschreibung	74
Abbildung 41: Zweiter Bereich des VBA-Excel basierten Tools zur ganzheitlichen Fehlerbeschreibung	75
Abbildung 42: Dritter Bereich des VBA-Excel basierten Tools zur ganzheitlichen Fehlerbeschreibung	76
Abbildung 43: Vierter und fünfter Bereich des Tools zur ganzheitlichen Fehlerbeschreibung	77
Abbildung 44: Ganzheitliche Beschreibung einer Fehlerentstehung [eigene Darstellung in Anlehnung an Westkämper 1997, Zingel 2013, S. 50]	78
Abbildung 45: Überführung des Fehlernetzes aus Szenario 1 in das Tool zur Fehlerbeschreibung [Eigene Darstellung, mit Bezug auf die ganzheitliche Beschreibung einer Fehlerentstehung aus Kapitel 2.1.1.1]	78
Abbildung 46: Prinzipdarstellung zur Implementierung von Informationen aus dem PSM in die FMEA (Eigene Darstellung, in Anlehnung an [Schlüter et al. 2018; AIAG und VDA 2019])	81

Abbildung 47:	Darstellung der gesamten Entwicklung der modellbasierten und ganzheitlichen Methodik der Fehleranalyse (MemogaFa) [Eigene Darstellung]	83
Abbildung 48:	Prinzipdarstellung des K-VEC Systems [Sequoia 2019]	84
Abbildung 49:	Systemgrenze des K-VEC Systems Abhängig von dem Nutzungsprozess "Bus lädt an der Haltestelle" [Sequoia 2019].....	88
Abbildung 50:	Komponenten-Hierarchie bzw. physikalische Struktur des K-VEC Systems	89
Abbildung 51:	MDM mit Funktionen, Nutzungsprozessen und Komponenten mit Fokus auf den Nutzungsprozess "Bus lädt an der Haltestelle"	90
Abbildung 52:	Ausgefüllte Quadranten der Wechselwirkungen mit dem Fokus auf den Nutzungsprozess "Bus lädt an der Haltestelle" [Eigene Darstellung].....	92
Abbildung 53:	Potentiell Fehlernetz (oder Szenario) „Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)“ [Eigene Darstellung].....	94
Abbildung 54:	Überführung des Fehlernetzes „EMV“ in das Tool zur Fehlerbeschreibung [Eigene Darstellung].....	97
Abbildung 55:	Auszüge aus dem Fehlerbeschreibungstool, detaillierte Beschreibung der Fehlernetze zu drei erarbeiteten Szenarien für das K-VEC System im Tool der Fehlerbeschreibung [Eigene Darstellung].....	98
Abbildung 56:	Funktionsprinzip der Linearmaschine (Langstator Asynchron-Drehstromlinearantrieb) im Vergleich zu der rotierenden Maschine [in Anlehnung an Wörner 2013].....	100
Abbildung 57:	MDM mit Funktionen, Nutzungsprozessen und Komponenten mit dem Fokus auf den Nutzungsprozess "Konstant fördern"	104
Abbildung 58:	Ausgefüllte Quadranten der Wechselwirkungen mit dem Fokus auf den Nutzungsprozess "Konstant fördern" [Eigene Darstellung]	106
Abbildung 59:	Potentiell Fehlernetz, Szenario „Elektrischer Kurzschluss“ im Q-ELF Systemmodell [Eigene Darstellung].....	107
Abbildung 60:	Überführung des Fehlernetzes „Elektrischer Kurzschluss“ in das Tool zur Fehlerbeschreibung [Eigene Darstellung].....	109
Abbildung 61:	Detaillierte Beschreibung der Fehlernetze zu drei erarbeiteten Szenarien für das Q-ELF System im Tool der Fehlerbeschreibung [Eigene Darstellung]	111
Abbildung 62:	Vorgehensweise zur Erstellung einer FMEA (Produkt und Prozess) [in Anlehnung an AIAG und VDA 2019].....	145
Abbildung 63:	Diagramm zur Ursache-Wirkungs-Analyse (Ishikawa) [in Anlehnung an DIN EN 31010]...	148
Abbildung 64:	Darstellungsform der FTA mit Bezug auf Systemebenen [in Anlehnung an Preiss 2009, S. 79 und DIN 61025, S. 20]	150
Abbildung 65:	Das Bow-Tie Diagramm [in Anlehnung an Klipper, 2015, S. 145; DIN EN 31010, S. 64; Schneider 1996, S. 119 und Preiss 2009, S. 102].....	151
Abbildung 66:	Zusammenhang zwischen RBD (a) und FTA (b) [Eigene Darstellung]	153
Abbildung 67:	Beispiel eines Markov-Modells [In Anlehnung an DIN EN 31010, S. 68].....	155
Abbildung 68:	SE als interdisziplinäre Disziplin [in Anlehnung an Weilkiens 2007]	158

Abbildung 69:	Software Faults und Software Failures in einem „Blackbox-Software Modul [in Anlehnung an Krishna 2008, S. 1.194]	160
Abbildung 70:	Das Black- und Greybox-Modell [in Anlehnung an Dyckhoff und Spengler 2010 und Parnell et al. 2011]	160
Abbildung 71:	Identifikation der Zusammenhänge der Fehlerursachen und –auswirkung anhand des Black-Greybox Modells [Eigene Darstellung in Anlehnung an Krishna 2008, Dyckhoff und Spengler 2010 und Parnell et al. 2011]	161
Abbildung 72:	Beispiel von einem erarbeiteten Szenario zum kritischen Nutzungsprozess „Bus lädt an der Haltestelle“ aus dem K-VEC Systemmodell [eigene Darstellung]	164
Abbildung 73:	Potentielltes Fehlernetz, Szenario „Schnee auf dem Ladeteppich“ [Eigene Darstellung]	165
Abbildung 74:	Potentielltes Fehlernetz, Szenario „Regenwasser“ [Eigene Darstellung]	166
Abbildung 75:	Beispielszenario „Erwärmung des eisernen Rückschlusses“ im Q-ELF Systemmodell [Eigene Darstellung]	167
Abbildung 76:	Beispielszenario „elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)“ im Q-ELF Systemmodell [Eigene Darstellung]	168
Abbildung 77:	Abschnitt 1 - Allgemeine Informationen	169
Abbildung 78:	Abschnitt 2 – Fehlerursachen	170
Abbildung 79:	Abschnitt 3 - Wirkung der Fehlerursache(n)	171
Abbildung 80:	Abschnitt 4 - Fehlerauswirkung.....	172
Abbildung 81:	Abschnitt 5 - Risikomatrix nach VDA [VDA Band 4]	173
Abbildung 82:	Auszüge aus dem Fehlerbeschreibungstool (Bereiche 1 und 2), detaillierte Beschreibung der Fehlernetze zu drei erarbeiteten Szenarien für das K-VEC System im Tool der Fehlerbeschreibung [Eigene Darstellung].....	174
Abbildung 83:	Auszüge aus dem Fehlerbeschreibungstool (Bereiche 3, 4 und 5), detaillierte Beschreibung der Fehlernetze zu drei erarbeiteten Szenarien für das K-VEC System im Tool der Fehlerbeschreibung [Eigene Darstellung].....	175
Abbildung 84:	Auszüge aus dem Fehlerbeschreibungstool (Bereiche 1 und 2), detaillierte Beschreibung der Fehlernetze zu drei erarbeiteten Szenarien für das Q-ELF System im Tool der Fehlerbeschreibung [Eigene Darstellung].....	176
Abbildung 85:	Auszüge aus dem Fehlerbeschreibungstool (Bereiche 3, 4 und 5), detaillierte Beschreibung der Fehlernetze zu drei erarbeiteten Szenarien für das Q-ELF System im Tool der Fehlerbeschreibung [Eigene Darstellung].....	177
Abbildung 86:	Komponenten-Komponenten Hierarchie K-VEC System [Überarbeitete Abbildung aus LOOME0]	178
Abbildung 87:	Prozesse-Prozesse Matrix, K-VEC System [Überarbeitete Abbildung aus LOOME0]	179
Abbildung 88:	Funktionen-Komponenten Matrix aus K-VEC System [Überarbeitete Abbildung aus LOOME0]	180
Abbildung 89:	Komponentenhierarchie des Langstator-Asynchron-Drehstromlinearantriebs (Prinzipdarstellung aus Loomeo [in Anlehnung an Riekhof und Willing 2013])	181

Abbildung 90: Abfolge der Nutzungsprozesse des Langstator-Asynchron-Drehstromlinearantriebs (Prinzipdarstellung, überarbeitet aus LOOME0 [in Anlehnung an Riekhof und Willing 2013]).	182
Abbildung 91: Abfolge der Funktionen zum Nutzungsprozess „Konstant fördern“ des Langstator-Asynchron-Drehstromlinearantriebs (Prinzipdarstellung, überarbeitet aus LOOME0 [in Anlehnung an Riekhof und Willing 2013])	183
Abbildung 92: Komponenten und Funktionen des Langstator-Asynchron-Drehstromlinearantriebs (Prinzipdarstellung aus Loomeo [in Anlehnung an Riekhof und Willing 2013])	184

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Definitionen zum Begriff "Fehler"	12
Tabelle 2:	Dimensionen von Fehlern	18
Tabelle 3:	Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik bzw. für eine einheitliche und synthetisierte Beschreibung von Fehlern resultierend aus der Analyse von Fehlerdefinition und Fehlerarten und den Forschungsfragen (Kapitel 1.2)	20
Tabelle 4:	Anforderungen an einen Modellierungs-Ansatz für die ganzheitliche, modellbasierte Fehleranalysemethodik.....	23
Tabelle 5:	Erläuterung der Systemsichten [in Anlehnung an Winzer 2016, S. 130].....	25
Tabelle 6:	Bewertung der untersuchten Ansätze für die Modellierung von Produktsystemen anhand der Anforderungen aus den Forschungsfragen und in Bezug auf deren Anwendbarkeit für die modellbasierte Fehleranalyse	27
Tabelle 7:	Auszug aus standardisierter Beschreibung und Notationen von DeCoDe-Systemelementen, Relationen und Attributen [Eigene Darstellung in Anlehnung an Nicklas 2016; Mamrot 2014; Riekhof et al. 2013; Schlund 2011; Ott 2009; Feldhusen et al. 2013]	36
Tabelle 8:	Abgeleitete Anforderungen aus Modellen, Modellierungssprachen und Regeln.....	36
Tabelle 9:	Anforderungen abgeleitet aus der Fehlerbeschreibung.....	39
Tabelle 10:	Zuordnung der Methoden der Fehleranalyse in Abhängigkeit der Datensituation in Anlehnung an [ISO 26262-9; Bertsche 2009]	41
Tabelle 11:	Vorläufige Anforderungen (VA) an die neue MemogaFa resultierend aus den Methoden der Fehleranalyse und den Forschungsfragen	45
Tabelle 12:	Korrelationsmatrix hinsichtlich der Anforderungen an die Entwicklung der MemogaFa	46
Tabelle 13:	Anforderungen an die eigene Methodik aus den Methoden der Fehleranalyse in der PE	47
Tabelle 14:	Bewertung der bekanntesten Methoden der Fehleranalyse aus der Qualitätswissenschaften und der Zuverlässigkeitsanalyse anhand der Anforderungen [in Anlehnung an DIN EN 31010; ISO IEC, Kamiske 2013, Schnieder 2013].....	47
Tabelle 15:	Zusammenfassung aller Anforderungen an die neue zu entwickelnde MemogaFa.....	49
Tabelle 16:	Informationen aus der PE als Input für das Systemmodell [Eigene Darstellung]	58
Tabelle 17:	Zusammenhang zwischen Funktionen, Komponenten und physikalischen Effekten [in Anlehnung an Breidert 2007, S. 39].....	64
Tabelle 18:	Beispiele von physikalischen Effekten, Energiearten und Erscheinungsformen [in Anlehnung an Feldhusen et al. 2013, S. 375]	66
Tabelle 19:	Bidirektionaler Informationsaustausch zwischen der erweiterten Modellierung (Systemmodell, Ereignisse und Umweltfaktoren) und Methoden der Fehleranalyse [in Anlehnung an VDA 2006, S. 151].....	80
Tabelle 20:	Grobe Prozessanalyse des K-VEC Systems.....	86
Tabelle 21:	Grobe Prozessanalyse des Q-ELF Systems für die potentiellen Nutzungsprozesse.....	102
Tabelle 22:	Bewertung der Anforderungserfüllung der entwickelten Methodik	113

Tabelle 23:	Standardisierte Beschreibung und Notationen von DeCoDe-Systemelementen, Relationen und Attributen (Eigene Darstellung in Anlehnung an [Nicklas 2016; Mamrot 2014, Riekhof et al. 2013, Schlund 2011, Ott 2009)	140
Tabelle 24:	Zusammengefasste Erkenntnisse zur FMEA und Ableitungen der Anforderungen an die zu entwickelnde MemogaFa [in Anlehnung an Preiss 2009, DIN EN 60812, Klipper 2015, DIN EN 31010, ISO/IEC 31010, Kamiske 2013, Schnieder 2013]	147
Tabelle 25:	Zusammengefasste Ergebnisse zu Ishikawa und Ableitungen der Anforderungen an MemogaFa [in Anlehnung Klipper 2015, DIN EN 31010, ISO/IEC 31010, Kamiske 2013].	149
Tabelle 26:	Zusammengefasste Erkenntnisse zu FTA, ETA und Bow-Tie und Ableitungen der Anforderungen an MemogaFa [in Anlehnung an Preiss 2009, Klipper 2015, DIN EN 31010; ISO/IEC 31010, Kamiske 2013, Schnieder 2013, DIN 25424]	152
Tabelle 27:	Zusammengefasste Ergebnisse zu RBD und Ableitungen der Anforderungen an MemogaFa [in Anlehnung an Meyna 2010; Schnieder 2013; DIN 61078]	154
Tabelle 28:	Zusammengefasste Ergebnisse zur Markov-Analyse und Ableitungen der Anforderungen an MemogaFa [in Anlehnung; Schnieder 2013, DIN EN 31010, ISO IEC 31010].....	156
Tabelle 29:	Gestaltungsleitsätze für die Vernetzung von Systemelementen [Eigene Darstellung, in Anlehnung an Riekhof et al. 2013].....	159

Abkürzungsverzeichnis

DSM	Design Structure Matrix
DMM	Domain Mapping Matrix
DeCoDe	Demand Compliant Design
DLA	Drehstromlinearantrieb
ETA	Event Tree Analysis
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
FTA	Fault Tree Analysis
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FMECA	Failure Mode and Effects and Criticality Analysis
FuSi	Funktionale Sicherheit
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineering
MdF	Methoden der Fehleranalyse
MemogaFa	M ethodik für eine m odellbasierte und g anzheitliche F ehleranalyse
MDM	Multi Domain Matrix
MBSE	Model-Based Systems Engineering
PS	Produktsystem
PSM	Produktsystemmodell
PE	Produktentwicklung
PLC	Product Life Cycle
RBD	Reliability Block Diagramm
SE	Systems Engineering
SysML	Systems Modeling Language
UML	Unified Modeling Language
VDA	Verband der Automobilindustrie

Vokabularium der verwendeten Fachbegriffe

Fachbegriff	Definition
Attribut	„Ein Attribut stellt eine der Eigenschaften eines Systems, dessen Elemente oder Wechselbeziehungen dar“ [Schlund 2011, S. 189].
DeCoDe	Ein Ansatz zur standardisierten Beschreibung eines technischen Systemmodells unter den Grundsätzen des systematischen Denkens und Handelns (in Anlehnung an [Winzer 2016]).
Element	Elemente können als kleinster Teil eines Systems oder Sub- / Teilsystems verstanden werden und materieller oder immaterieller Natur sein (in Anlehnung an [Winzer 2016]).
Fehleranalyse	Untersuchung, bei der etwas zergliedert, ein Ganzes in seine Bestandteile zerlegt wird, um Fehler zu identifizieren (eigene Definition in Anlehnung an [Duden 2020]).
Ganzheitlichkeit im Sinne der Fehleranalyse	Im Kontext zur Fehleranalyse und dieser Arbeit bedeutet „ganzheitlich“, dass bei der Fehleranalyse alle relevanten Faktoren berücksichtigt werden sollen, welche potentielle Fehler verursachen können [eigene Definition].
Komplexität	Die Komplexität wird als die Vielzahl der Elemente (Varietät) und deren Vielzahl der Relationen (Konnektivität) sowie Wechselwirkungen in einem System aufgefasst [Luhmann 1980].
Methode	„Planmäßiges Vorgehen in einer Abfolge von Tätigkeiten zum Erreichen eines bestimmten Ziels. Methoden können sowohl bewusst als auch unbewusst entstehen und ablaufen bzw. angewandt werden“ [Ehrlenspiel und Meerkamm 2013, S. 748].
Methodik	Methodik ist ein planmäßiges Vorgehen, unter Einschluss mehrerer Methoden, zur Erreichung eines bestimmten Ziels nach einem Vorgehensplan, unter Einschluss von Strategien, Methoden, Werkzeugen und Hilfsmitteln (in Anlehnung an [Winzer 1997]).
Modell	Ein Modell ist ein zweckgebundenes, partielles und / oder vereinfachtes Abbild von etwas Realem oder Vorstellbarem zur Erreichung eines Ziels [Schlüter und Reiche 2019].
Modellbasierte Analyse	Eine Analyse, die auf Modellen basiert, welche standardisiert und modularisiert werden können (in Anlehnung an [Winzer 2016]).

Modellierung	Eine Vorgehensweise, bei der Daten, Informationen und Wissen (z. B. Expertenwissen) genutzt werden, um unter Berücksichtigung von bestimmten Modellierungsregeln ein Modell oder Systemmodell zu erstellen [eigene Definition].
Modellierungssprache	Modellierungssprachen sind künstlich definierte Sprachen, die dazu dienen, Modelle, d.h. abstrahierende Beschreibungen, zu erstellen [Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik 2019].
Produktsystem	Die Sichtweise auf ein Produkt als ein System [eigene Definition].
Produktsystemmodell	Ein Modell, das ein technisches Produkt abbildet [eigene Definition].
System	Systeme sind etwas Zusammengesetztes bzw. Zusammengehöriges, welche durch sieben Bestandteile (System-Input /-Output, die Systemumwelt, die Systemgrenze, die Systemelemente, deren Struktur, Relationen und Systemverhalten) bestimmt werden (in Anlehnung an [Haberfellner 2012; Lindemann 2005]).
Systemelement	Besteht aus einer spezifischen Domäne (oder Sicht) ein technisches System [eigene Definition].
Systemmodell	Ein zweckgebundenes Modell eines zu entwickelnden und/oder realen (technischen) Systems. Dabei ist das Systemmodell dynamisch und es entsteht aus dem Zusammenspiel von Methoden, Sprachen (Modellierungssprache) und Werkzeugen (in Anlehnung an [Echterhof 2016; Winzer 2016]).
Systemansichten	Sichtweise aus der Produktentwicklung eines technischen Systems (ursprünglich von Suh [Suh 1998]). Systemansichten können Anforderungen, Funktionen, Komponenten und Prozesse sein [eigene Definition].
Szenario	Eine konkrete Ausprägung eines je nach Fachdisziplin weit in die Zukunft gerichteten Anwendungsfalls (Use-Case), welcher kausale Zusammenhänge betrachtet (in Anlehnung an [Weilkiens 2015; Gausemeier und Fink 1999]).
Use Case	Use Case ist die Beschreibung eines angedachten (oder bestehenden) Nutzungsprozesses, welcher den Umgang des Nutzers mit dem System beschreibt (in Anlehnung an [Jacobson, 1987]).

Werkzeug

Ein Werkzeug ist ein Hilfsmittel, das die Anwendung von Methoden unterstützt [Ponn und Lindemann 2011]. Es dient der Visualisierung, dem Speichern/Verwalten von Informationen, dem Erkennen von Zusammenhängen oder math. Berechnungen (in Erweiterung von [Schnieder 1999]). Der Begriff Werkzeug wird synonym zu den Begriffen Instrument und Tool verwendet (in Anlehnung an [Ponn und Lindemann 2011; Schnieder 1999; Winzer 2014]).

1 Einleitung

Die Qualität und Zuverlässigkeit von Produkten sind zwei der wichtigsten Schlüsseigenschaften und Garanten für den Erfolg eines Unternehmens. Um die Qualität und Zuverlässigkeit von Produkten zu gewährleisten, muss dafür gesorgt werden, dass potentielle Fehler, die sich auf die Qualität und Zuverlässigkeit eines Produktes auswirken, bereits in der Produktentwicklung (PE)¹ identifiziert und frühzeitig beseitigt werden. Daher ist die PE, insbesondere die Konzeptphase, ein Hebel zur proaktiven Vermeidung möglicher Fehlerkosten und Rückrufaktionen. Welche Folgen diese Kosten haben können, veranschaulicht das Diagramm „Prüfstufe, bei der der Fehler seine Wirkung zeigt“ anhand des Faktors „Ausfallkosten“ (vgl. Abbildung 1).

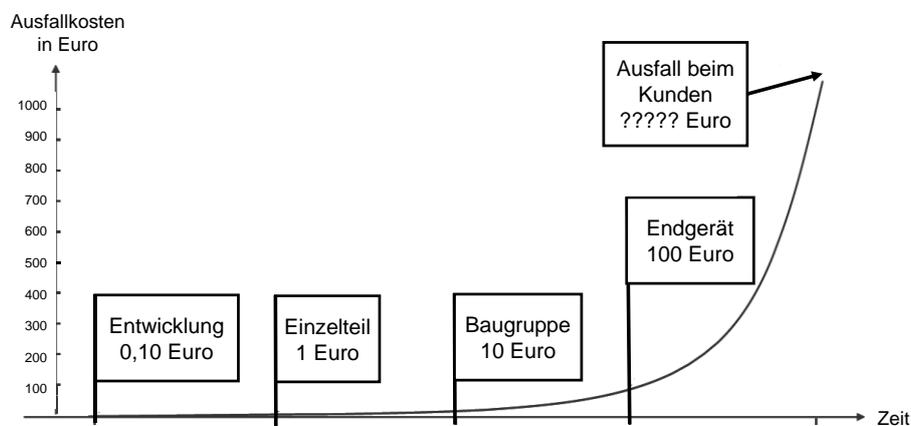


Abbildung 1: "Prüfstufe, bei der der Fehler seine Wirkung zeigt" [in Anlehnung an Masing 2014, S. 588]

Aus Abbildung 1 kann entnommen werden, dass die Fehler- und Ausfallkosten höher werden je später diese im Produktlebenszyklus (PLC) auftreten. Diese Kosten können am Anfang niedrig sein (z.B. Änderung in den frühen Phasen der PE), dann rasant steigen (z. B. Kosten für Gewährleistung bzw. Rückhol-/ Rückrufaktion) und mit Regressansprüchen aus Produkthaftungsfällen enden [Masing 2014]. Um Fehler präventiv zu vermeiden und die damit verbundenen Kosten zu minimieren, bedarf es einer **systematischen** und **ganzheitlichen**² Fehleranalyse.

¹ Produktentwicklung wird in dieser Arbeit als eine Abfolge von festgelegten Phasen, von der Produktkonzeption bis zu der Produktrealisierung, definiert [Eigner et al. 2014].

² In dieser Arbeit und im Kontext zu der Fehleranalyse bedeutet „ganzheitlich“, dass bei der Analyse alle relevanten Faktoren berücksichtigt werden sollen, die potentielle Fehler verursachen können. Dazu zählen neben den Elementen aus dem Systemmodell (Funktionen, Komponenten usw.) auch die Umweltfaktoren (z. B. Temperatur) oder die physikalischen Effekte (z. B. Elektromagnetische Wellen) und Ereignisse (z. B. Autounfall, Naturkatastrophe usw.).

1.1 Problemstellung

In der Wissenschaft und Praxis existieren derzeit viele Methoden der Fehleranalyse (MdF) und Fehlervermeidung, u. a. die Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA), die Fehlerbaumanalyse (FTA) oder die Ishikawa-Methode. Diese können aber die ansteigende Komplexität³ von Produktsystemen, insbesondere in der Mechatronik, nicht mehr bewältigen. Hintergrund dessen ist, dass die Methoden, welche zum Teil in den 60er- oder 70er-Jahren (z. B. FMEA und Fehlerbaumanalyse) für den „damaligen“ Bedarf entwickelt worden sind. Infolge können mögliche Fehler bei den heutigen komplexen und mechatronischen Systemen mit den gegenwärtig eingesetzten MdF nicht mehr umfassend analysiert werden [Mamrot et al. 2015; Schnellbach 2016].

Ein Beispiel dafür liefert an dieser Stelle die FMEA, eine der bekanntesten Methoden in der Zuverlässigkeitsanalyse [Bertsche et al. 2009]. Bei der Durchführung der FMEA werden Auswirkungen einzelner Fehler betrachtet, jedoch Fehlerkombinationen, Wechselwirkungen, Beziehungen und Abhängigkeiten von mehreren Systemelementen nicht erfasst [Preiss 2009; DIN EN 60812]. Dabei existieren nicht nur Wechselwirkungen, Beziehungen und Abhängigkeiten innerhalb eines technischen Systems, sondern auch zwischen diesem und seiner Umwelt (vgl. Abbildung 2).

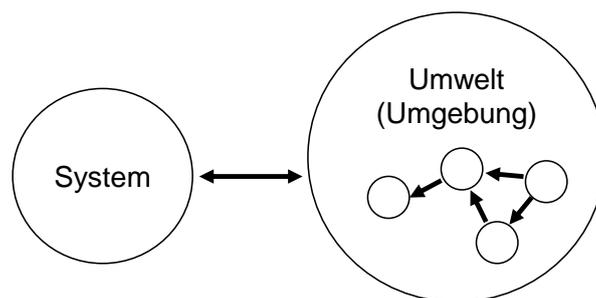


Abbildung 2: Interaktion des Systems mit seiner Umwelt [in Anlehnung an Hitchins 2007, S 71]

Zwar werden bei der Ishikawa-Methode die Umwelt und die Umweltfaktoren berücksichtigt, jedoch als einzelne, isolierte Einflussfaktoren. Umweltfaktoren können aber in Wechselbeziehung zueinander stehen und/oder in Kombination eine negative Auswirkung auf das System haben (vgl. Abb. 2). Dieser Zusammenhang ist bislang noch unzureichend erforscht und stellt somit **die erste Forschungslücke** dar.

(1) Die aktuellen Methoden der Fehleranalyse (MdF) behandeln „nur“ Teilaspekte von Fehlern (beispielsweise werden die Umweltfaktoren ungenügend berücksichtigt), zudem werden Wechselwirkungen und gegenseitige Beeinflussungen unzureichend betrachtet.

³ Komplexität wird in dieser Arbeit als die Vielzahl der Elemente (Varietät) und deren Vielzahl an Relationen (Konnektivität) sowie Wechselwirkungen in einem System aufgefasst [Luhmann 1980].

Aber wie kann diese Forschungslücke geschlossen werden, wie können Fehler ganzheitlich erfasst und analysiert werden? Eine mögliche Lösung dafür bietet eine systematische Untersuchung, wodurch das zu betrachtende Objekt im Rahmen der Fehleranalyse in seine Bestandteile (Elemente) zerlegt wird. Anhand der Zerlegung können die Elemente und deren Beziehungen detailliert analysiert werden.

Vor dem Hintergrund der PE erfolgt eine systematische Zerlegung und Untersuchung von Produktsystemen (PS) mithilfe des Systems Engineering (SE). Dabei nutzt das SE die Grundprinzipien des systemischen Denkens. Nur wenn das Produkt als ein System verstanden und als Modell abgebildet wird, kann die Komplexität fassbar und beherrschbar gemacht werden [Winzer 2016]. Vor allem bei der Analyse der Wechselbeziehungen zwischen den unterschiedlichen Einflussfaktoren, welche zu einem potentiellen Fehler führen können, kann die Nutzung des Systemmodells vorteilhaft sein. Überdies liefert das Systemmodell die Grundlage für ein gemeinsames Verständnis innerhalb eines multidisziplinären Teams [Winzer 2016; Haberfellner 2012].

Dass die Nutzung eines Systemmodellansatzes durchaus sinnvoll ist, belegt auch die [DIN EN 60812], in der es heißt: „Zur Bestimmung der Auswirkung eines Ausfalls müssen die auf höherer Ebene hervorgerufenen, resultierenden Ausfälle und möglicherweise auch die auf gleicher Ebene hervorgerufenen betrachtet werden. Die Analyse sollte, wo immer möglich, die Kombination von Ausfallarten oder deren Folge angeben, die Ursache einer Auswirkung auf höherer Ebene war. In diesem Fall ist zusätzliche Modellbildung erforderlich, um das Ausmaß oder die Eintrittswahrscheinlichkeit einer solchen Auswirkung abzuschätzen“ [DIN EN 60812, S. 7].

Dabei gibt die Norm keine konkreten Hinweise, wie „der Weg“ zur Modellbildung erfolgen soll. Zudem fehlt es an eine gemeinsame Sprache bei den unterschiedlichen Fachdisziplinen (Maschinenbau, Elektrotechnik, Software und Messtechnik), um ein gemeinsames Verständnis in der PE zu etablieren. Darüber hinaus wird in der Norm betont, dass die Nutzung der FMEA „schwierig und mühsam“ ist, wenn bei komplexen Systemen „Mehrfach-Funktionen, an denen unterschiedlichen Systemkomponenten beteiligt sind“ [DIN EN 60812, S. 31]. Der Grund dafür ist, dass die multidimensionalen Beziehungen und „Verflechtungen“ zwischen mehreren Funktionen mit Komponenten in einem vorgefertigten FMEA-Formblatt mit geradlinigen Vorgaben nicht fassbar sind. Dieser Zusammenhang soll durch die schematische und vereinfachte Darstellung aus Abbildung 3 verdeutlicht werden.

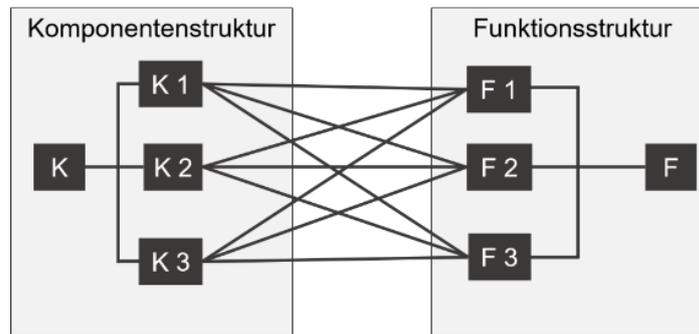


Abbildung 3: Schematisches Beispiel einer Vernetzung zwischen einer Komponenten- und Funktionsstruktur [Eigene Darstellung]

Die oben dargestellte Problematik ist nicht nur bei der FMEA, sondern bei den meisten, bekannten MdF präsent [Schnellbach 2016]. Ein standardisiertes und transdisziplinäres Systemmodell kann dieser Problematik entgegenwirken [Winzer 2016], denn es ermöglicht, Abhängigkeiten der Systemelemente untereinander zu identifizieren und schafft somit die Bedingungen für eine ganzheitliche Fehleranalyse. Zudem eröffnet ein interdisziplinäres Systemmodell eine umfassende Perspektive auf das Gesamtsystem. Es stellt das Gesamtsystem mit seinen inhärenten, komplexen Zusammenhängen transparent dar, sodass die „Ganzheitlichkeit“ für die Fehleranalyse ermöglicht wird.

Jedoch ein standardisiertes Systemmodell mit standardisierten Elementen und Relationen **im Hinblick auf die Fehleranalyse** ist ein Desiderat in der Wissenschaft und Praxis und bildet daher die **zweite Forschungslücke** in dieser Arbeit.

(2) Ein standardisiertes Systemmodell mit einer erweiterten Betrachtung (z. B. von Umweltfaktoren) im Hinblick auf die Fehleranalyse ist ein Desiderat in der Wissenschaft und Praxis.

Nicht nur, dass es an einem standardisierten Systemmodell mangelt, auch der Begriff des „Fehlers“ wird im Zusammenhang mit den MdF nicht eindeutig definiert. Etwa im VDA Band 4 oder im FMEA-Handbuch von VDA und AIAG wird der „Fehler“ zwar sehr oft erwähnt, jedoch als Komposition, z. B. Fehlerkosten, Fehlerfortpflanzung, Fehlerstruktur oder Fehlerfolgeketten [vgl. VDA 2006; AIAG und VDA 2019]. Auch in anderen Normen, beispielsweise zur Methode FTA, wird der Begriff Fehler nicht explizit konkretisiert. Im weitesten Sinne wird er als ein „Fehlzustand“ und „Fehlzustandsbaum“ mit einem „Hauptereignis“ oder „Top-Event“ beschrieben, das einen Komponenten- oder Systemausfall bedeuten kann. Es wird aber nicht konkret erläutert, was unter dem Begriff Fehler verstanden wird [vgl. DIN 25 424; IEC 61025]. Was aber bedeutet ein Fehler? Diese Frage wird in der Fachliteratur und in den Normen unzureichend beantwortet. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass **eine einheitliche Definition und Beschreibung des Begriffs „Fehler“ in der Fachliteratur zu den MdF nicht vorhanden sind.**

Dabei ist eine einheitliche Fehlerdefinition von großer Bedeutung, weil ein unterschiedliches Fehlerverständnis bei der Durchführung einer MdF von einem interdisziplinären Expertenteam zu unterschiedlichen Ergebnissen führt [vgl. Willing und Winzer 2015]. Daraus ergibt sich die **dritte Forschungslücke**.

(3) Es gibt unterschiedliche Fehlerdefinitionen, die nicht kohärent sind. Fehler werden dadurch unterschiedlich beschrieben.

Es fehlt eine einheitliche Fehlerdefinition und ein Systemmodell mit standardisierten In- und Output-Informationen. Eine einheitliche Beschreibung von Fehlern beispielsweise auf Basis einer einheitlichen Struktur, erlaubt einen Vergleich zwischen unterschiedlichen Fehlern und einen standardisierten Informationsaustausch zwischen Systemmodell und MdF. Auf diese Weise kann eine effiziente und sinnvolle Kopplung realisiert werden, weil die Input- und Output-Informationen zwischen Methoden und Modellen miteinander „kompatibel“, also einheitlich sind. Dies löst nicht nur die Problematik des unterschiedlichen Fehlerverständnisses in einem Expertenteam, sondern verbessert auch die Analyse und Auswertung von Fehlern. Zusammengefasst ergeben sich **folgende Forschungslücken**, die in dieser Arbeit fokussiert werden:

- (1) Die aktuellen Methoden der Fehleranalyse behandeln „nur“ Teilaspekte von Fehlern (beispielsweise werden die Umweltfaktoren ungenügend berücksichtigt), zudem werden Wechselwirkungen und gegenseitige Beeinflussungen unzureichend betrachtet.**
- (2) Ein standardisiertes Systemmodell mit einer erweiterten Betrachtung (z. B. von Umweltfaktoren) im Hinblick auf die Fehleranalyse ist ein Desiderat in der Wissenschaft und Praxis.**
- (3) Es gibt unterschiedliche Fehlerdefinitionen, die nicht kohärent sind. Fehler werden dadurch unterschiedlich beschrieben.**

Aus den Forschungslücken resultiert der Bedarf einer **modellbasierten (2) und ganzheitlichen (1) Methodik der Fehleranalyse mit einer umfassenden und einheitliche Fehlerbeschreibung (3), die alle genannten Faktoren inklusive Wechselwirkungen umfasst.**

1.2 Zielsetzung

Das Ziel der Arbeit ist die **Entwicklung einer Methodik für eine modellbasierte und ganzheitliche Fehleranalyse (MemogaFa)**. Die Methodik soll in der **PE (von Konzept- bis zur Testphase)** für **technische Produktsysteme** Anwendung finden. Dabei soll der Fokus der Fehleranalyse auf der **Nutzungsphase** eines technischen Produkts liegen. Zudem soll die Methodik auf die Zukunft gerichtet, also proaktiv, sein. Der Mittelpunkt der Methodik ist die Fehleranalyse, **Maßnahmen zur**

Optimierung sowie Vorschläge zur Verbesserung des zu untersuchenden technischen Systems gehören nicht zum Anwendungsbereich der Methodik.

Zur Erreichung der aufgezeigten Zielsetzung wurden **Forschungsfragen aus den Forschungslücken** abgeleitet, welche die inhaltliche Auseinandersetzung in der Arbeit bestimmen soll:

1. Wie lassen sich Fehler einheitlich definieren und beschreiben? Gibt es dazu Antworten in der Fachliteratur und in den Normen? (**Forschungslücken 3**)
2. Welche Arten von Fehlern gibt es? Wie werden Fehlern klassifiziert? (**3**)
3. Welche MdF gibt es derzeit in der Wissenschaft und Praxis für die Anwendung in der PE? (**1**)
4. Wie soll das Systemmodell gestaltet sein, um eine ganzheitliche Fehleranalyse zu realisieren? Welcher Ansätze gibt es dazu in der Wissenschaft und Praxis? (**2**)
5. Wie können sowohl die Elemente eines Systems als auch deren Relationen sinnvoll attribuiert werden, um notwendige Details der Fehleranalyse zu berücksichtigen? (**2**)
6. Wie werden Wechselwirkungen zwischen dem Produktsystem und seiner Umwelt bei der Fehleranalyse miteinbezogen? Welche relevanten Faktoren sind bei einer „ganzheitlichen“ Fehleranalyse zu berücksichtigen? (**2**)

Zugleich bestimmen die Forschungsfragen die Herangehensweise und Struktur der Arbeit.

1.3 Herangehensweise und Struktur der Arbeit

Durch die Beantwortung der Forschungsfragen soll das Ziel der Arbeit erreicht werden. Dafür wurde ein Lösungsweg entwickelt, der in Verbindung mit der Struktur der gesamten Arbeit in Abbildung 4 vorgestellt wird.

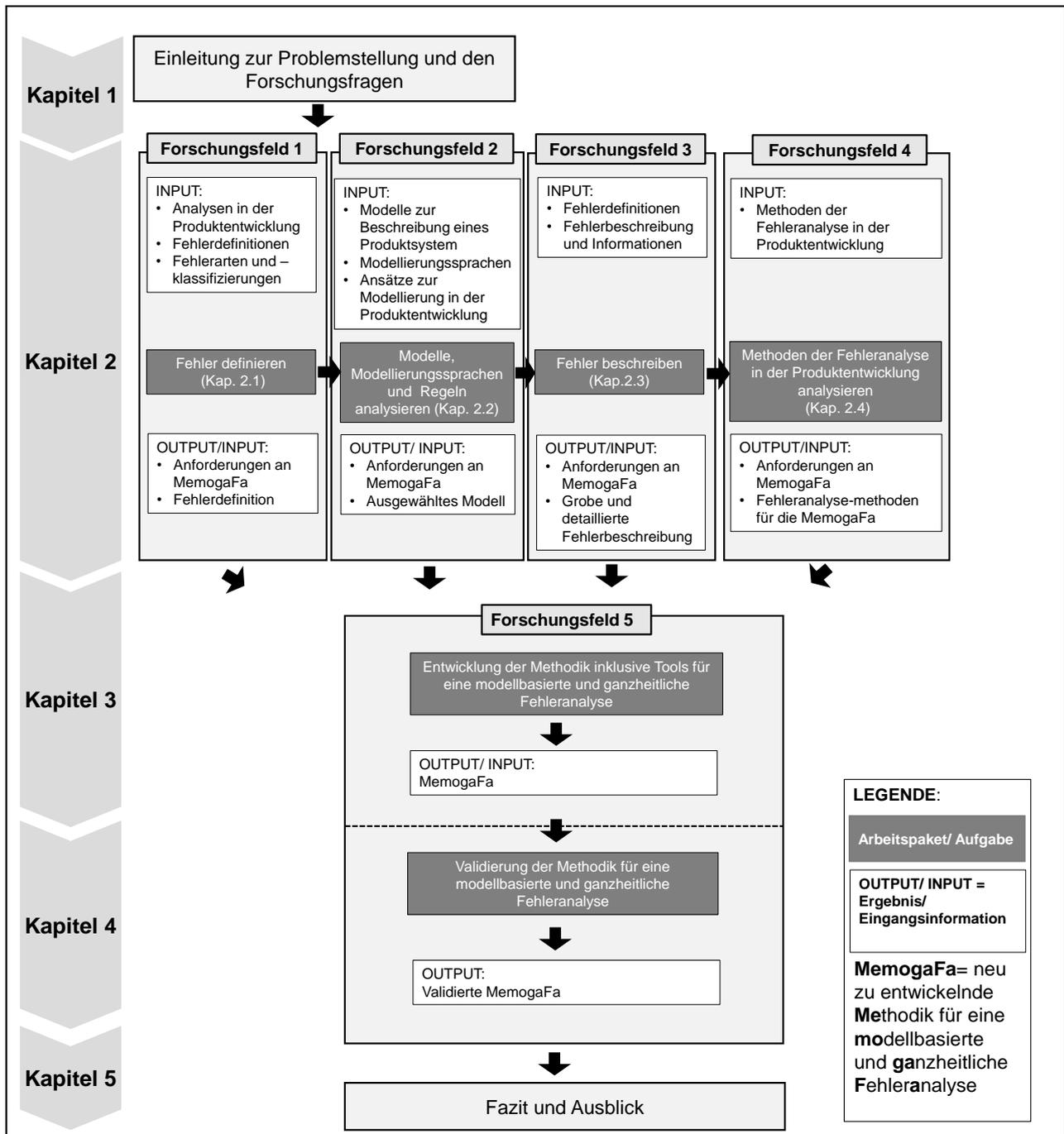


Abbildung 4: Darstellung der Vorgehensweise und der Forschungsfelder im Zusammenhang

Die Struktur der Arbeit wird durch **die Forschungsfelder bestimmt, welche aus der Problemstellung und den Forschungsfragen generiert wurden:**

- **Forschungsfeld 1:** Fehlerdefinition, Fehlerarten und -klassifizierung
- **Forschungsfeld 2:** Modelle, Modellierungssprachen und Softwaresysteme
- **Forschungsfeld 3:** Fehlerbeschreibung und Informationen
- **Forschungsfeld 4:** Methoden der Fehleranalyse in der Produktentwicklung
- **Forschungsfeld 5:** Entwicklung und Validierung der MemogaFa.

Im Rahmen der Bearbeitung dieser fünf Forschungsfelder sollen die oben vorgestellten Forschungsfragen beantwortet sowie das Ziel der Arbeit erreicht werden. Um das Ziel zu erreichen, werden die Ergebnisse (Outputs) aus den einzelnen Forschungsfeldern für die Entwicklung der Methodik (Forschungsfeld 5) genutzt (vgl. Abbildung 4).

Neben der separaten Betrachtung der Forschungsfelder 1 bis 4 ist zudem eine Abstimmung der Forschungsarbeiten in diesen Bereichen untereinander erforderlich, da diese Schnittstellen zueinander aufweisen. So hat die Festlegung einer Fehlerdefinition (Forschungsfeld 1) Auswirkung auf die Fehlerbeschreibung (Forschungsfeld 3), die die Modellierung der Fehler beeinflusst (Kapitel 2). Zudem kann die Wahl der Modellierung sowohl Auswirkung auf die Beschreibung und die Identifizierung als auch auf die Analyse von Fehlern haben.

Nach erfolgter Analyse der Forschungsfelder 1 bis 4, die miteinander interagieren, werden die Ergebnisse aus diesen in das Forschungsfeld 5 (Entwicklung der Methodik inklusive Tools für eine modellbasierte und ganzheitliche Fehleranalyse) zusammengeführt und im Rahmen eines Lösungsprozesses betrachtet. Die hier gewonnenen Erkenntnisse führen schließlich zur neuen MemogaFa (Kapitel 3). Anschließend wird die MemogaFa an zwei Anwendungsbeispielen validiert (Kapitel 4).

2 Theoretische Grundlagen und Stand der Technik

Wie in der Zielsetzung dieser Arbeit beschrieben, soll die zu entwickelnde Methodik **in der Phase der PE** angewendet werden. Um dies zu erreichen ist es erforderlich, sich mit den **Begrifflichkeiten** der „**Produktentwicklung**“ und des „**Fehlers**“ auseinanderzusetzen. Die Analyse dazu erfolgt im nachfolgenden Kapitel 2.1. Anschließend wird eine geeignete Modellierung im Kapitel 2.2 bestimmt, um der Forderung der modellbasierten und ganzheitlichen Methodik⁴ nachzukommen. Eine konkrete Herausarbeitung zur Fehlerbeschreibungen erfolgt in Kapitel 2.3. Im Kapitel 2.4 werden die aktuellen und bekannten MdF in der PE untersucht, um Verbesserungspotentiale herauszufinden, die in die neue Methodik integriert werden sollen. Aus allen vier Kapiteln werden Anforderungen an die neu zu entwickelnde MemogaFa hergeleitet.

2.1 Produktentwicklung und Fehlerbegriff

Die PE ist eine eigenständige Phase aus dem Produktlebenszyklus. In der Regel beinhaltet die PE drei Entwicklungsprozesse: Vorentwicklung, Detailentwicklung und die Verifikation (Testen) [vgl. VDI 4003:2007, S. 28].

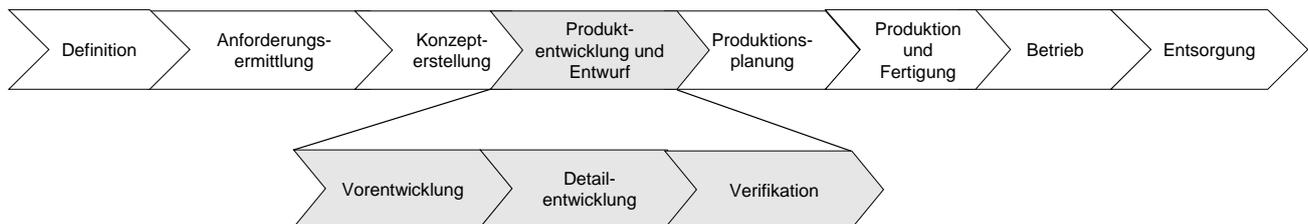


Abbildung 5: Product Life Cycle [in Anlehnung an Spath et al. 2000; Bertsche 2004; Kamiske 2013; VDI 4003:2007] mit Subprozessen der Entwicklung [VDI 4003:2007, S. 28]

Im Rahmen der PE sind verschiedene Aufgaben zu erfüllen. Winzer [Winzer 2016] benennt hierzu drei Hauptaufgaben: Zielbildung, Analyse und Gestaltung. Für diese Arbeit ist die Aufgabe der Analyse fokussiert worden, da der Schwerpunkt auf der Fehleranalyse liegt. In der PE gibt es eine Vielzahl an Analysen, je nach zu betrachtendem Problem oder Systemgegenstand. Im weiteren Verlauf werden jedoch nur Analysen der PE betrachtet, die sich auf „Fehler“ fokussieren. Dafür wird zunächst der Begriff „Fehler“ im nachfolgenden Kapitel definiert.

⁴ Methodik ist ein planmäßiges Vorgehen unter Einschluss mehrerer Methoden zur Erreichung eines bestimmten Ziels nach einem Vorgehensplan unter Einschluss von Strategien, Methoden, Werkzeugen und Hilfsmitteln [In Anlehnung an Winzer 1997, S. 107].

2.1.1 Fehler



Um die Grundlage für die Entwicklung einer Methodik für eine ganzheitliche und modellbasierte Fehleranalyse zu schaffen, ist es zuerst notwendig zu klären, was unter dem Begriff „Fehler“ in der technischen und ingenieurwissenschaftlichen Fachliteratur verstanden wird. Der

Begriff „Fehler“ wird in Normen, aber auch im Zusammenhang mit unterschiedlichen MdF nicht konkret definiert (siehe hierzu Kapitel 2.1.1.1). Folglich bedarf es einer genaueren Untersuchung in der Fachliteratur und in den entsprechenden Normen, um das Verständnis für die Fehlerdefinition zu erhöhen. Hierzu werden Definitionen aus den Bereichen der allgemeinen Ingenieurwissenschaften und den Normen aus den Qualitätswissenschaften sowie der Sicherheits- und Zuverlässigkeitstechnik analysiert. Des Weiteren soll untersucht werden, welche Erkenntnisse aus der Literatur zu Fehlerarten und Fehlerklassifikationen gewonnen werden können, um unterschiedliche Arten von Fehlern sinnvoll zu systematisieren und klassifizieren (siehe hierzu Kapitel 2.1.1.2). Die Betrachtung von soziologischen und psychologischen Aspekten eines Fehlers, die speziell aus der Handlung von Personen („human error“) [Badke-Schaub et al. 2012] entstehen, erfolgt nur marginal, da der Fokus auf technischen und nicht auf soziotechnischen⁵ Systemen liegen soll.

2.1.1.1 Fehlerdefinitionen

In der internationalen und nationalen Fachliteratur und Normen wird der Begriff „Fehler“ unterschiedlich definiert, wie nachfolgend gezeigt wird. Bei einigen Definitionen lassen sich Gemeinsamkeiten konstatieren, während andere einen signifikanten Unterschied aufweisen. Bekanntermaßen wird in der Norm für Qualitätsmanagement, DIN EN ISO 9000:2015, Fehler als „Nichtkonformität: Nichterfüllung einer Anforderung“ [DIN EN ISO 9000:2015, S. 40] definiert. Hingegen bezeichnet DIN 55350 einen Fehler als „Nichterfüllung vorgegebener Forderung durch einen Merkmalswert“ [DIN 55350, S. 2]. Nennenswert sind die Resultate der Analyse hinsichtlich des Fehlerbegriffs in der internationalen Literatur, da im internationalen Raum der Begriff „Fehler“ sehr differenziert betrachtet wird. Folgende fünf englische Begriffe werden alle auf Deutsch mit „Fehler“ übersetzt:

- **Failure,**
- **Fault,**
- **Error,**
- **Malfunction** und
- **Mistake.**

⁵ Ein soziotechnisches System wird verstanden als (Arbeits-) Organisation, welche sowohl aus sozialen als auch technischen Elementen besteht [nach Maucher et al., 2002].

Im Folgenden werden diese Begriffe isoliert eruiert, weil sie unterschiedliche Bedeutung haben.

In der Norm zur Funktionalen Sicherheit (ISO 26262) wird der Fehlerbegriff „**failure**“ als „die Beendigung der Fähigkeit eines Elements die geforderte Funktion zu erfüllen“ definiert [vgl. ISO 26262, Teil 1, S. 7]. Die Beschreibung des „**failure**“ als Nichterfüllung einer Funktion kommt auch in weiteren Quellen vor, u. a. bei Isermann [Isermann 2006] oder in IEC [IEC 61508]. Diese definieren „**failure**“ als Verlust bzw. Unterbrechung der Fähigkeit eines Systems, die spezifische und erforderliche Funktion zu erfüllen. In diesem Zusammenhang ist hervorzuheben, dass bei beiden Definitionen der Bezug zum System gegeben ist. Hingegen fehlt der Systembezug bei der Fehlerbetrachtung in der DIN EN ISO 9000:2015. Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass die Definitionen zum Begriff „**failure**“ Gemeinsamkeiten aufweisen oder sich ergänzen.

Im Gegensatz dazu wird „**fault**“ unterschiedlich definiert. Während in ISO 26262 **fault** als „abnormale“ Bedingung bezeichnet wird, beschreibt Isermann [Isermann 2006] **fault** als unzulässige Abweichung. Dagegen formuliert Veseley/Stamatelatos **fault** als ein Ereignis: „...more general events“ [Vesely und Stamatelatos 2002, S. 26]. Dabei bezieht sich „**fault**“ auf Elemente (in ISO 26262-1 Komponente, S. 6), Teilsysteme oder charakteristische Merkmale [vgl. ISO 26262, S. 7; Isermann 2006, S. 20].

Der Begriff „**error**“ wird meistens als eine Abweichung beschrieben, entweder von einem „spezifischen Wert [ISO 26262-1] oder von einer Ausgabe der Funktion im Hinblick auf ihre Spezifikation [Bertsche et al. 2009]. Hingegen werden mit „**malfunction**“ die „...Unregelmäßigkeiten bei der Erfüllung der gewünschten Funktion“ bezeichnet [vgl. Isermann 2006, S. 21].

Anders als bei den anderen vier Begriffen (Failure, Fault, Error und Malfunction), welche sich auf technische Systeme beziehen, ist mit dem Begriff „**mistake**“ Fehler in den Handlungen von Personen gemeint, also „Gedankenfehler bei kognitiven Aktivitäten“ [vgl. Badke-Schaub et al. 2012, S. 50]. Im Allgemeinen weisen die Definitionen zwar Unterschiede auf, widersprechen sich aber nicht. Zudem ist festzuhalten, dass die meisten Definitionen vordergründig auf die Nichterfüllung einer Funktion eingehen. Die unterschiedlichen Definitionen aus den Normen und Fachliteratur werden in der Tabelle 1 komprimiert vorgestellt.

Tabelle 1: Definitionen zum Begriff "Fehler"

Begriff	Definition	Quelle
Fehler	„ Unzulässige Abweichung eines Merkmals .“	Ellouze, 2010, S. 6
Fehler	„Nichtkonformität: Nichterfüllung vorgegebene Forderung durch einen Merkmalswert .“	DIN 55350, S. 2
Fehler	„Nichtkonformität: Nichterfüllung einer Anforderung .“	DIN EN ISO 9000:2015, S. 40
Fault	„Ungewöhnliche („abnormale“) Bedienung, die dazu führen kann, dass ein Element oder (Teil-) System ausfällt.“	ISO 26262-1, S. 7
Fault	„Ein „fault“ kann entweder ein struktureller Defekt in einer Komponente oder ein Programmierfehler sein. Hierdurch können „errors“ hervorgerufen werden. „Faults“ können in schlafend oder aktiv sowie temporär oder permanent unterteilt werden.“ (Anmerkung: errors können Folgen von faults sein)	Bertsche et al. 2009, S. 28
Fault	„ unzulässige Abweichung von mindestens einer charakteristischen Eigenschaft (Merkmal) des Systems aus der akzeptablen, üblichen Standardbedingung.“	Isermann 2006, S. 20
Fault	„...“ faults are “higher order” or more general events .“	Vesely und Stamatelatos 2002, S. 26
Error	„ Abweichung zwischen dem berechneten und dem spezifischen Wert .“	ISO 26262-1, S. 7
Error	„Der „error“ ist die bemerkbare Abweichung oder Diskrepanz der Ausgabe der Funktion von den Spezifikationen. Ein „error“ bedeutet, dass das System sich in einem fehlerhaften Zustand befindet, so dass weiteres Voranschreiten zu einem Versagen führen wird.“	Bertsche et al. 2009, S. 28
Failure	„Beendigung der Fähigkeit einer Einheit die geforderte Funktion zu erfüllen. (Anmerkung: „After Failure the item has a fault“, S. 10)“	IEC 62059-31-1, S. 10
Failure	„ Beendigung der Fähigkeit eines Elements (Komponente) die geforderte Funktion zu erfüllen.“	ISO 26262-1, S. 7
Failure	„Verlust der Fähigkeit eines Systems die spezifische Funktion zu erfüllen.“	IEC 61508-4, S. 22
Failure	„Ein „failure“ beschreibt die Abweichung der erbrachten Leistung von der in der Spezifikation geforderter Leistung .“	Bertsche et al. 2009, S. 28
Failure	„ permanente Unterbrechung der Fähigkeit eines Systems , eine erforderliche Funktion unter bestimmten Betriebsbedingungen durchzuführen.“	Isermann 2006, S. 20
Failure	“Failures are basic abnormal occurrences .“	Vesely und Stamatelatos 2002, S. 26
Mal-function	„Intermittierende Unregelmäßigkeiten bei der Erfüllung der gewünschten Funktion . (Anmerkung: Intermittierend ist eine kurzzeitige Unterbrechung mit nachfolgenden Pausen)“	Isermann 2006, S. 21
Mistake	„ Gedankenfehler bei kognitiven Aktivitäten“	Badke-Schaub et al. 2012, S. 50

Obwohl „failure“ und „fault“ unterschiedlich definiert werden (vgl. Tabelle 1), besteht zwischen den beiden Begriffen einen Zusammenhang, wie in Abbildung 6 dargestellt. Aus Abbildung 6 ist zu erkennen, dass aus einer Ursache (Root cause) ein fault entsteht, der einen failure zufolge hat. Die Beziehung zwischen den Begriffen kann als eine sequenzielle Abfolge verstanden werden, die eine Ursache, Wirkung und Folge beinhaltet.

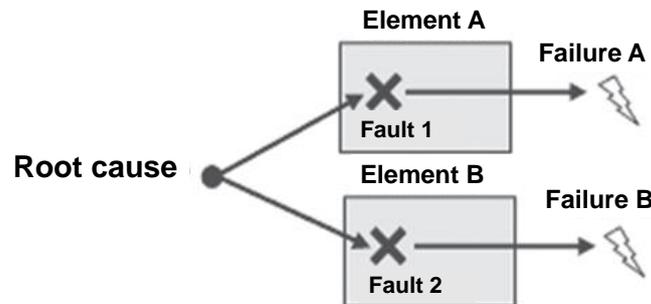


Abbildung 6: Zusammenhang zwischen Root cause, Fault und Failure [in Anlehnung an ISO 26262-1, S. 3]

Diese Beziehung zwischen Ursache, Wirkung und Folge demonstriert auch Westkämper [Westkämper 1997], indem er die unterschiedlichen Begriffe aus den deutschen Normen (z. B. DIN 55350; DIN 55350-11; DIN 40041; DIN 40042; DIN 31051) in einen zeitlichen Kontext bringt (vgl. Abbildung 7).

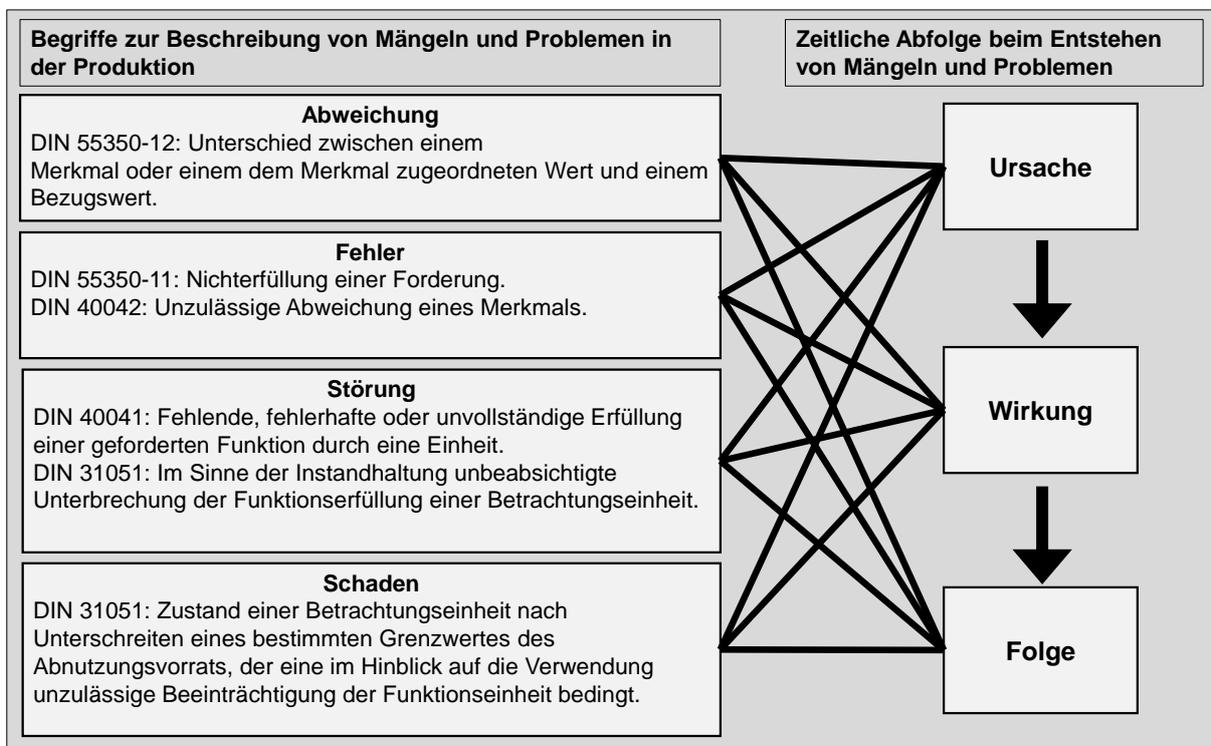


Abbildung 7: Beschreibung einer Fehlerentstehung als zeitliche Abfolge anhand der Begriffe Abweichung, Fehler, Störung und Schaden [in Anlehnung an Westkämper 1997 und Ellouze 2010, S.6]

Bemerkenswert dabei ist, dass bei der Analyse der unterschiedlichen Definitionen von Fehlern, der **Funktion** eine wesentliche Rolle zugeordnet wird (vgl. Tabelle 1). In der Fachliteratur zur PE wird die Funktion zwar unterschiedlich definiert, aber vor dem Hintergrund der oben dargestellten Abfolge des Fehlers, scheint die Betrachtung der erweiterten Funktionsdefinition nach Zingel [Zingel 2013] besonders sinnvoll. Laut Zingel [Zingel 2013] besteht eine Funktion aus einem Input, einer Aktivität und einem Output und entspricht der Wirkungskette (eines Fehlers) aus drei Bestandteile:

- Ursache (Auslöser),
- Effekt (als eine logische, physikalische oder mathematische Gleichung) und
- Wirkung (Ergebnis) [vgl. Zingel 2013].

Im Zusammenhang mit der Funktion betrachtet Zingel den Fehler nicht nur als eine Wirkungskette aus Ursache und Wirkung, sondern stellt den Effekt in den Mittelpunkt und ordnet diesen der Aktivität der Funktion zu. Der Effekt ist somit das „Bindeglied“ zwischen Ursache und Wirkung eines Fehlers (vgl. Abbildung 8).

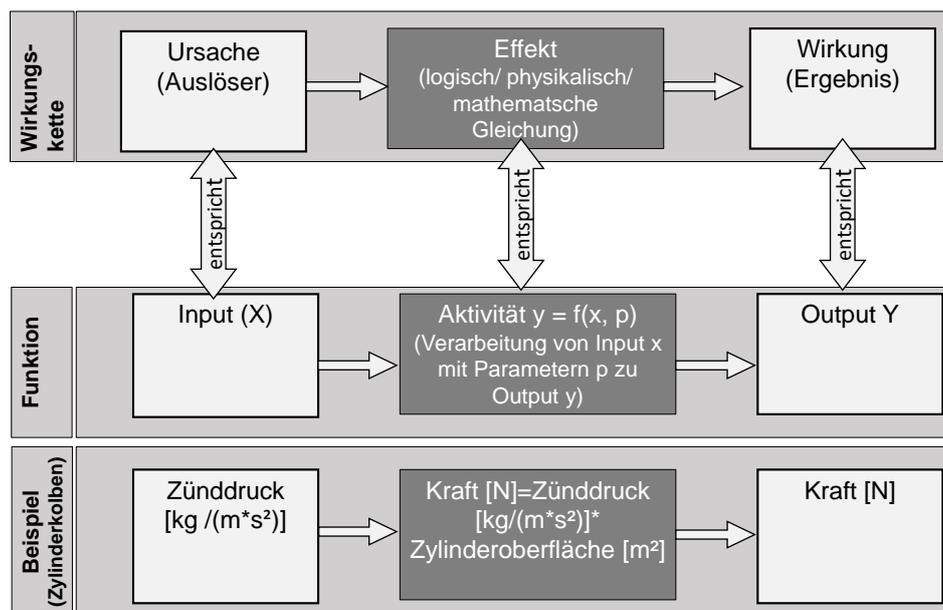


Abbildung 8: Ursache und Wirkung Zusammenhänge, dargestellt als Funktion [in Anlehnung an Zingel 2013, S. 50]

Infolge wird die Fehlerdefinition (aus Ursache, Wirkung und Folge) um den Effekt ergänzt. Damit ergibt sich aus den gewonnenen Erkenntnissen zu den unterschiedlichen Bedeutungen und Definitionen von Fehlern eine **umfassende und ganzheitliche Fehlerbeschreibung**, welche in Abbildung 9 vorgestellt wird.

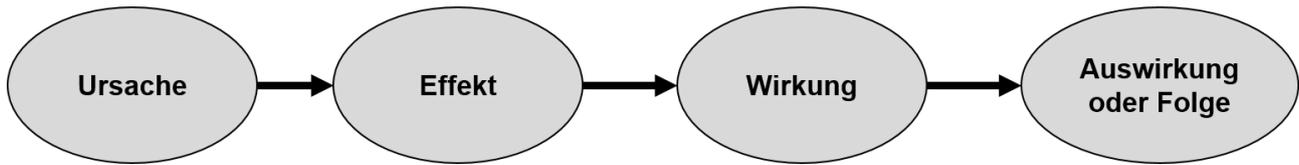


Abbildung 9: Ganzheitliche Beschreibung einer Fehlerentstehung [eigene Darstellung in Anlehnung an Westkämper 1997, Zingel 2013, S. 50]

Aus Abbildung 9 ist zu entnehmen, dass die ganzheitliche Beschreibung einer Fehlerentstehung aus Ursache, Effekt, Wirkung und Auswirkung oder Folge besteht. Zudem lassen sich einzelne Fehlerdefinitionen aus Tabelle 1 zu den Bestandteilen der ganzheitlichen Fehlerbeschreibung (Ursache, Effekt, Wirkung und Auswirkung oder Folge) zuordnen. Bspw. kann eine „Nichterfüllung einer Funktion“ [vgl. die Definition nach Isermann 2006] die Ursache für die Entstehung eines Fehlers sein.

Jedoch reicht allein die Betrachtung der Fehlerdefinitionen nicht aus, um Fehler fundiert zu beschreiben. Wie ist der zeitliche Verlauf von Fehlern? Welche Art von Ursachen oder Auswirkungen existieren? Eine Auseinandersetzung mit diesen Fragen erfolgt im nächsten Abschnitt, in dem unterschiedlichen Arten, Klassifikationen und Dimensionen von Fehlern analysiert werden.

2.1.1.2 Fehlerarten und Fehlerklassifizierung

In DIN ISO EN 9001:2015 wird das Aufbewahren von Informationen über die Fehlerart ausdrücklich gefordert, neben der Dokumentation der getroffenen Korrekturmaßnahmen und den Ergebnissen der angewendeten Analysen [DIN ISO EN 9001:2015, S. 40]. Zur Unterteilung von Fehlern in Arten oder Kategorien gibt es in der Fachliteratur unterschiedliche Sichtweisen. Nach Ellouze [Ellouze 2010] liegt die Bedeutung der Klassifizierung von Fehlerarten in deren Priorisierung. Dabei klassifiziert Ellouze Fehler nach folgenden drei Fehlerarten:

- bekannte und erwartete Fehler,
- bekannte aber unerwartete Fehler und
- unbekannte Fehler [Ellouze 2010].

Bekannte und erwartete Fehler sind Fehler, die in der gleichen Form bereits aufgetreten sind und somit bekannt sind. Diese können dann mit einem geeigneten Überwachungsverfahren (z. B. statistische Prozesskontrolle) präventiv vermieden werden. Bekannte, aber unerwartete Fehler sind Fehler, die zwar bekannt sind, aber an Stellen in Prozessen auftreten, an denen sie nicht vermutet werden. Da diese Fehler jedoch bekannt sind, können die bislang bekannten Maßnahmen zur Fehlerabstellung analog umgesetzt werden. Wenn aber Fehler auftreten, die weder bekannt noch erwartet sind, entsteht eine neue Situation, die die Erarbeitung von neuen präventiven Maßnahmen erfordert.

Nach dem Auftreten eines Fehlers erfolgt eine Bewertung basierend auf dessen Auswirkungen [Elouze 2010]. Dafür gibt es in der Literatur unterschiedliche Kriterien. Eine vergleichsweise „einfache“ Kategorisierung hinsichtlich der Auswirkungen von Fehlern erfolgte bereits 1985 in der **DIN 55350-31**. In der Norm werden **drei Kriterien zur Kategorisierung und Klassifizierung von Fehlern** empfohlen:

- kritischer Fehler (Ein kritischer Fehler ist mit Personenschaden verbunden oder führt zum Ausfall wichtiger Funktionen eines technischen Systems).
- Hauptfehler (Ein Hauptfehler führt zu einem Ausfall der Funktion, vermindert die Anwendbarkeit z. B. eines Produkts, es kommt aber nicht zum Personenschaden).
- Nebenfehler (Ein Nebenfehler beeinflusst die Anwendbarkeit des Produkts bzw. technischen Systems geringfügig, führt aber zu keiner Minderung der Funktion) [DIN 55350-31].

Die **VDA 3 erweitert** die oberen **drei Arten zur Kategorisierung von Fehlern** mit dem Fokus auf die Schadensschwere der Fehlerauswirkung:

- kritische Fehlerauswirkung (z. B. Personenschaden),
- hohe Fehlerauswirkung (z. B. hohe Schaden am Fahrzeug),
- mittlere Fehlerauswirkung (z. B. Ausfall der Hauptfunktion) und
- niedrige Fehlerauswirkung (z. B. Nichterfüllung einer Komfortfunktion) [vgl. VDA 3].

Im Hinblick auf die Ausfallart und die Schadensschwere von Fehlern gibt es weitere Klassifizierungen, wie bspw. in der Norm zur FMEA [DIN EN 60812] oder im Handbuch zur FTA für NASA [Veseley und Stamatelatos 2002]:

- katastrophal (Eine Ausfallart, die möglicherweise zum Ausfall der Hauptfunktionen des Systems führen und daher dem System und seiner Umgebung ernsthaften Schaden zuführen und/oder zu Personenschäden führen kann.),
- kritisch (Eine Ausfallart, die möglicherweise zum Ausfall der Hauptfunktionen des Systems führen und daher dem System und seiner Umgebung ernsthaften Schaden zuführen kann, aber keine ernsthafte Gefahr für Leib und Leben darstellt.),
- geringfügig (Eine Ausfallart, die möglicherweise die Systemleistungsfunktion(en) herabsetzen kann, ohne nennenswerten Schaden für das System oder Gefahr für Leib und Leben.) und
- unbedeutend (Eine Ausfallart, die möglicherweise die Systemfunktionen herabsetzen kann, aber dem System keinen Schaden zufügt und keine Gefahr für Leib und Leben darstellt.) [DIN EN 60812, S. 14, und Vesely und Stamatelatos, 2002, S. 17].

Ergänzend dazu, betrachten Isermann, Bertsche und Reif das Ausmaß der Auswirkungen von Fehlern als globale (z. B. Gesamtsystemebene) oder lokale (z. B. Teilsystem- oder Komponentenebene) Auswirkungen [Isermann 2006; Bertsche 2009, S. 56; Reif 2012, S. 258].

Eine weitere Charakterisierung von Fehlern erfolgt nach dem örtlichen Bezug. Schröder [Schröder 2016] empfiehlt zu differenzieren, ob ein Fehler in einem Prozess (prozessbezogen) oder in einem Produkt (produktbezogen) auftreten.

Der zeitliche Aspekt der Fehler bildet ein weiteres, wichtiges Kriterium für die Kategorisierung von Fehlern, da die Wirkungsdauer eines aufgetretenen Fehlers einen direkten Einfluss auf seine Auswirkung hat. Isermann und Reif differenzieren Fehler nach dem folgenden, zeitlichen Verhalten:

- transient (kurz, eine kurze Wirkungsdauer, wie z.B. ein kurzes Auftreten von elektromagnetischen Wellen, die zu einer Störung von empfindlichen, technischen Geräten führen können),
- dauernd (für eine längere Zeit konstantes Auftreten),
- periodisch (Auftreten nach dem gleichen Zeitintervall) sowie
- intermittierend (Häufig auftretender transienter Fehler mit nachfolgender Ruhepause/ oft durch Betrieb der Hardware an Belastungsgrenze) [Isermann 2006; Reif 2012].

Des Weiteren sortieren Badke [Badke-Schaub et al. 2012] und Algedri [Algedri et al. 2015] Fehler nach der Form des Auftretens wie folgt: systematisch, zufällig und sporadisch (vgl. Abbildung 10).

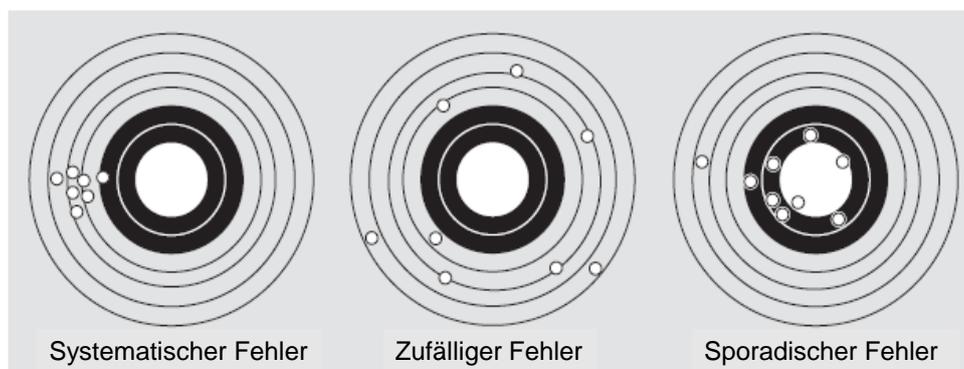


Abbildung 10: Art des Auftretens von Fehlern [in Anlehnung an Badke-Schaub et al. 2012, S. 49]

Die systematischen Fehler sind dadurch gekennzeichnet, dass diese immer wieder in selber Art und Weise sowie meistens im gleichen Zeitabstand auftreten. Hingegen treten zufällige Fehler auf unterschiedliche Art und Weise sowie aufgrund unterschiedlicher Ursachen auf.

Sowohl die zufälligen als auch die sporadischen Fehler treten ohne erkennbares Muster auf. Der Unterschied zwischen beiden liegt im Zeitintervall, denn die sporadischen Fehler treten im Vergleich zu den zufälligen Fehlern sehr selten auf. Die Form des Auftretens ist aber bei beiden identisch. Sowohl die zufälligen als auch die sporadischen Fehler sind problematisch, da es sehr schwierig ist,

abzuschätzen wann und wie sie auftreten [Badke-Schaub et al. 2012]. Daher ist es grundsätzlich wichtig, die Fehlerursachen frühzeitig zu identifizieren, um Fehlerauswirkungen zu vermeiden. Nach Halang [Halang 2013] und Krishna [Krishna 2008] gibt es drei Arten von Fehlerursachen:

- Softwarefehler (z.B. fehlerhafte Programmierung),
- Hardwarefehler (z. B. fehlerhafter Microcontroller) und
- Umwelteinflüsse (z. B. Temperatur, Druck, usw.).

Dabei ist zu beachten, dass die Fehlerursachen auch in Kombination auftreten können, d.h. als Kopplungsfaktoren („coupling factor“) [Krishna 2008, S. 624]. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Klassifizierung der Fehler nach Arten und Kategorien. Als eine zusammenfassende Bezeichnung der bislang erwähnten Typen, Arten, Klassifizierungen und Kategorien von Fehlern wurde der Begriff „Dimension“ verwendet (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Dimensionen von Fehlern

Dimension von Fehlern	Ausprägung(en) von Fehlern	Quelle
Sichten von Fehlern mit Bezug auf Fehlerdefinition und die Domänen der PE	<ul style="list-style-type: none"> • Nicht erfüllte Funktion • Nicht erfüllte Anforderungen • Ausfall eines Elements (bzw. Komponente) 	ISO 26262-1, S. 7; IEC 62059-31-1, S. 10; ISO 9000:2015, S. 40; Bertsche et al. 2009, S. 28
Ursachen von Fehlern	<ul style="list-style-type: none"> • Softwarefehler (z.B. fehlerhafte Programmierung) • Hardwarefehler (z. B. fehlerhafter Microcontroller) • Umwelteinflüsse (z. B. Temperatur, Druck...) 	Halang, 2013, S. 21; Krishna, 2008, S. 624
Form des Auftretens	<ul style="list-style-type: none"> • Systematisch • Zufällig • Sporadisch 	Isermann 2006, S. 32; Badke-Schaub et al. 2012, S. 49; Algedri und Frieling 2015, S. 11
Auswirkung	<ul style="list-style-type: none"> • Global (z. B. Gesamtsystem) • Lokal (z. B. Teilsystem) 	Bertsche 2009, S. 56; Reif 2012, S. 258
Ausfallart	<ul style="list-style-type: none"> • Primär (Ausfall bei zulässigen Einsatzbedingungen einer Komponente) • Sekundär (Folgeausfall, d.h. Ausfall bei unzulässigen Einsatzbedingungen einer Komponente) • Kommandierend (Ausfall infolge gemeinsamer Ursache) • Kaskadierend (mehrere Ausfälle von hintereinander geschalteten Komponenten, die zum Funktionsversagen eines Systems führen) 	DIN 25424-Teil 1, 1981, S. 2; ISO 26262-Tel 1, 2011, S. 3; Bertsche et al. 2004
Zeit	<ul style="list-style-type: none"> • transient (kurz, eine kurze Wirkungsdauer, wie z.B. ein kurzes Auftreten von elektromagnetischen Wellen, die zu einer Störung von empfindlichen, technischen Geräten führen können) • dauernd (für eine längere Zeit konstantes Auftreten) • periodisch (Auftreten nach dem gleichen Zeitintervall) • intermittierend (Häufig auftretender transients Fehler mit nachfolgender Ruhepause/ Oft durch Betrieb der Hardware an Belastungsgrenze) 	Reif, 2012, S. 258; Isermann, 2006, 32.

Fortsetzung Tabelle 2

Dimension von Fehlern	Ausprägung(en) von Fehlern	Quelle
Schweregrad nach VDA 3	<ul style="list-style-type: none"> • kritisch (Personengefährdung/ passives oder aktives Sicherheitsteil) • hoch (hoher Schaden am Fahrzeug / Umwelt oder Verletzung eines Gesetzes /Risikoteil) • mittel (Hauptfunktion wird nicht erfüllt/Standardteil) • niedrig (Komfortfunktion wird nicht erfüllt) 	Bertsche 2009, S. 35; VDA 3
Schweregrad nach DIN EN 60812 und Vesely	<ul style="list-style-type: none"> • Katastrophal (Eine Ausfallart, die möglicherweise zum Ausfall der Hauptfunktionen des Systems führen und daher dem System und seiner Umgebung ernsthaften Schaden zuführen und/oder zu Personenschäden führen kann.) • Kritisch (Eine Ausfallart, die möglicherweise zum Ausfall der Hauptfunktionen des Systems führen und daher dem System und seiner Umgebung ernsthaften Schaden zuführen kann, aber keine ernsthafte Gefahr für Leib und Leben darstellt.) • Geringfügig (Eine Ausfallart, die möglicherweise die Systemleistungsfunktion(en) herabsetzen kann, ohne nennenswerten Schaden für das System oder Gefahr für Leib und Leben.) • Unbedeutend (Eine Ausfallart, die möglicherweise die Systemfunktionen herabsetzen kann, aber dem System keinen Schaden zufügt und keine Gefahr für Leib und Leben darstellt.) 	DIN EN 60812, S. 14; Vesely, 2002, S. 17
Schweregrad nach DIN 55350-31	<ul style="list-style-type: none"> • Kritischer Fehler: Ein kritischer Fehler führt zum Personenschaden oder zum Ausfall wichtiger Funktionen von industriellen Anlagen oder Schiffen • Hauptfehler: Ein Hauptfehler führt zu einem Ausfall der Funktion, vermindert die Anwendbarkeit z. B. eines Produkts, es kommt aber nicht zum Personenschaden. • Nebenfehler: Ein Nebenfehler beeinflusst die Anwendbarkeit geringfügig, führt aber zu keiner Minderung der Funktion. 	DIN 55350-31
Bezug von Fehlerarten	<ul style="list-style-type: none"> • Prozessbezogen • Produktbezogen 	Schröder 2016, S. 96
Wissenstand über die Fehler	<ul style="list-style-type: none"> • Bekannt und erwartet • Bekannt und unerwartet • Unerwartet 	Ellouze, 2010, S. 47

Die Ergebnisse aus Tabelle 2 sind Basis für eine umfassende und fundierte Fehlerbeschreibung, welche im Kapitel 3 (Entwicklung der Methodik) erfolgen wird.

2.1.2 Zwischenfazit

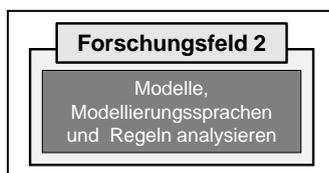
Die Analyse der Fehlerdefinition (vgl. Kapitel 2.1.1.1) sowie der Fehlerarten und Fehlerklassifizierung (vgl. Kapitel 2.1.1.2) belegen die in der Problemstellung formulierte These und Forschungslücke, dass **es unterschiedliche Fehlerdefinitionen gibt, die nicht kohärent sind und Fehler dadurch unterschiedlich beschrieben werden**. Eine kohärente Fehlerbeschreibung ist aber erforderlich, um das Ziel dieser Dissertation (die Entwicklung einer Methodik für eine modellbasierte und ganzheitliche Fehleranalyse) zu erreichen. Aus der Notwendigkeit für eine einheitliche Fehlerdefinition heraus, wurden Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik hergeleitet.

Tabelle 3: Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik bzw. für eine einheitliche und synthetisierte Beschreibung von Fehlern resultierend aus der Analyse von Fehlerdefinition und Fehlerarten und den Forschungsfragen (Kapitel 1.2)

Nr.	Anforderungen abgeleitet aus der Fehlerdefinition
A1	Die Fehlerbeschreibung muss die Wirkungskette (Ursache, Effekt, Wirkung und Auswirkung oder Folge) beinhalten.
A2	Der Bezug eines Fehlers (z. B. Anforderung, Funktion, Element oder Teilsystem) muss in der Beschreibung vorhanden sein.
A3	Für eine einheitliche Fehlerbeschreibung soll der Satzbau zur Beschreibung von Fehlern definierten und syntaktischen Regeln folgen.

Generell lässt sich feststellen, dass viele Definitionen und Arten von Fehlern einen Bezug zu einer Funktion, einem Element oder einem Teilsystem haben. Dies verdeutlicht, dass es empfehlenswert und sinnvoll ist, Fehler immer in Bezug zum System bzw. Systemmodell zu analysieren. Denn mithilfe eines Systemmodells können Fehler lokalisiert und genauer beschrieben werden [vgl. Winzer 2016, S. 205 und Anhang D]. Daher werden im nächsten Kapitel unterschiedliche Modelle und Ansätze aus der PE untersucht und bewertet, um das geeignete Modell für MemogaFa zu identifizieren.

2.2 Modelle, Ansätze zur Modellierung und Regeln



Im Folgenden wird auf die Bedeutung der Modellierung im Kontext der Fehleranalyse eingegangen. Zuerst werden allgemeine und spezifische Anforderungen an die Modellierung hergeleitet (Kapitel 2.2.1). Daraufhin erfolgt eine Analyse von Modellierungssprachen und Ansätzen zur Modellierung, damit eine für MemogaFa geeignete und spezifizierte Modellierung ausgewählt werden kann (Kapitel 2.2.2.). Diese ist letztlich mit benötigten Regeln auszustatten (Kapitel 2.2.4).

2.2.1 Vom allgemeinen zum spezifischen Modell eines Systems

Winzer definiert ein System als „ein Artefakt, ein Abbild der Realität in einer sehr abstrakten Form“ [Winzer 2016, S.3], während das Modell als „ein zweckgebundenes, partielles und/oder vereinfachtes Abbild von etwas Realem oder Vorstellbarem zur Erreichung eines Ziels“ verstanden wird [Schlüter und Reiche 2019]. Folglich dient das Modell zur Beschreibung und Abbildung von realen Systemen, um diese transparenter zu gestalten und besser untersuchen zu können. Es gibt unterschiedliche Ansätze zur Modellierung, welche mithilfe der jeweiligen Modellierungssprache (Notationen und Ontologie) Modelle generieren. Dennoch beinhalten diese Modelle in ihrem „Kern“ dieselben Bestandteile und Ontologien als Grundlage. Mit dieser Grundlage ist das allgemeine Modell gemeint, das in der Literatur oft als generisches Modell [vgl. Bursac 2016; Muschik 2011; Winzer 2016] oder

Basismodell [vgl. Weilkiens 2015] erwähnt wird. Das allgemeine Modell bildet die Basis jedes Modells, welches mit einem bestimmten Zweck und Ziel erstellt wird, also spezifisch ist. Es ist insofern wichtig, zwischen einem allgemeinen und spezifischen Modell zu unterscheiden, da das allgemeine Modell je nach Problem oder Ziel der Modellierung angepasst werden kann, während das spezifische Modell bereits konkretisiert wird und eine festgelegte Struktur beinhaltet. Daher nimmt der Grad der Konkretisierung vom allgemeinen zum spezifischen Modell zu. Die Pyramide in Abbildung 11 soll den Zusammenhang zwischen dem allgemeinen und spezifischen Modell symbolisieren.

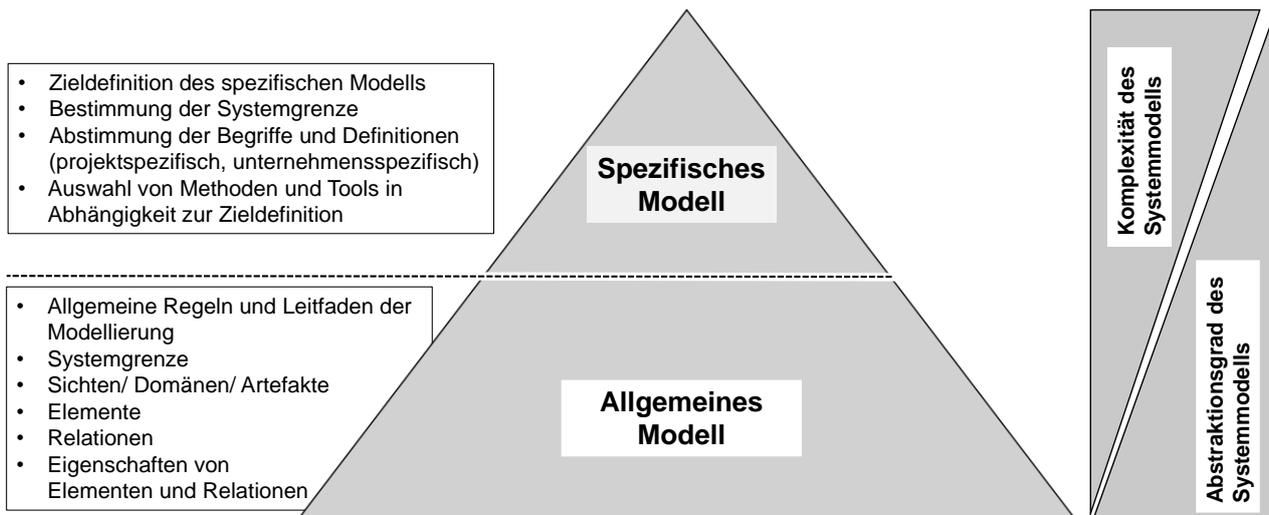


Abbildung 11: Angepasstes Systemmodell für eine ganzheitliche Fehleranalyse [Eigene Darstellung]

Dabei ist wichtig zu beachten, dass mit zunehmender Spezifikation und Detaillierung des Modells die Komplexität zunimmt. Im Gegensatz dazu stellt das allgemeine Modell eine stark vereinfachte Darstellung des zu untersuchenden Produktsystems dar. Das allgemeine Modell bildet den Grundstein jedes zielgerichteten, spezifischen Modells. Aus dem allgemeinen bzw. generischen Modell können unterschiedliche Domänen generiert werden, welche das System spezifizieren. Abbildung 12 veranschaulicht „den Weg“ vom generischen Modell über eine spezifische Domäne zum Systemmodell [vgl. Abbildung 12].

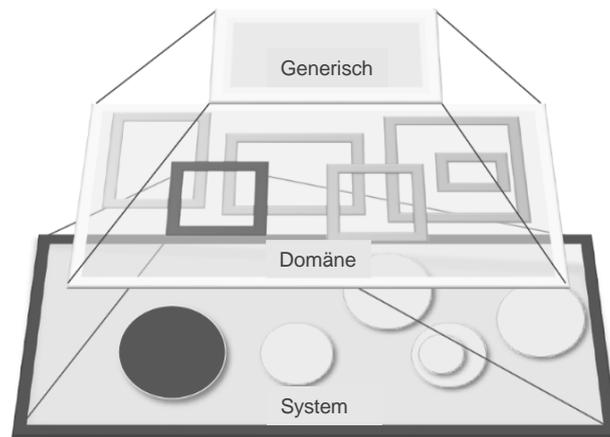


Abbildung 12: Zusammenhang zwischen dem generischen Modell, den Domänen und dem (domänen-spezifischen) System [in Anlehnung an Bursac 2016, S. 115]

Ein Systemmodell besteht in der Regel aus fünf Bestandteilen, die das Modell charakterisieren und grob beschreiben:

- System-Input und System-Output,
- Systemelementen,
- Systemrelationen (Beziehungen zwischen den Systemelementen),
- Systemgrenze und
- Systemumgebung.

Anhand dieser Bestandteile kann jedes reale System auf einer sehr abstrakten Ebene beschrieben werden. Der Zusammenhang zwischen diesen fünf Bestandteilen, die für jede Systembeschreibung erforderlich sind, wird in Abbildung 13 dargestellt.

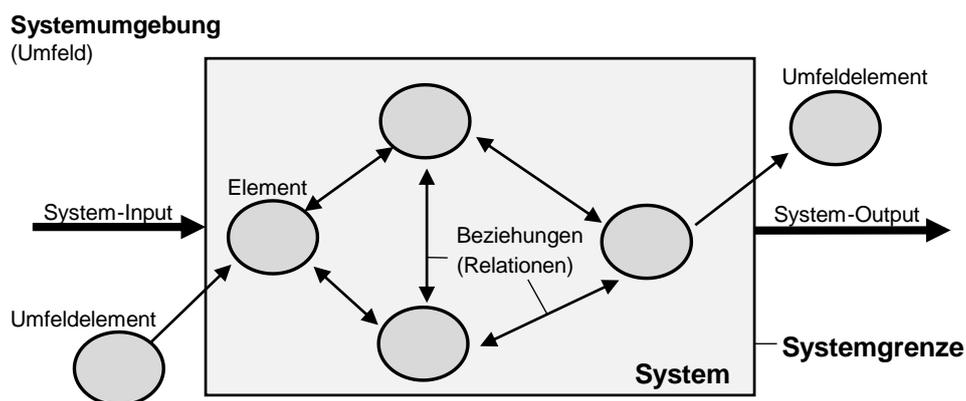


Abbildung 13: Notwendige Bestandteile eines Modells [in Anlehnung an Häuslein 2004, S.29]

Aufbauend auf dieser Struktur können die Systemelemente, Relationen, Systemumgebung und System-Input und -Output in einem spezifischen Modell genauer beschrieben werden. Im Hinblick auf die technischen Systeme (Gegenstand dieser Arbeit) bilden die Inputs und Outputs Informations-,

Material- oder Energieflüsse ab. Dabei sollen sowohl die Inputs und Outputs als auch die Systemelemente und –relationen standardisiert sein, damit ein Wissensaustausch zwischen MdF und dem Systemmodell problemlos erfolgen kann. Eine Anpassung an das „Wording“ soll ebenfalls möglich sein, insbesondere bezüglich der Elementbezeichnungen sowie deren Relationen und Attribuierungen. Insgesamt ergeben sich sechs Anforderungen an die Modellierungs-Ansätze (MA), die in Tabelle 4 vorgestellt werden.

Tabelle 4: Anforderungen an einen Modellierungs-Ansatz für die ganzheitliche, modellbasierte Fehleranalyse-methodik

Nr.	Anforderungen an die Modellierungs-Ansätze
MA1	Das Systemmodell muss so gestaltet sein, dass ein Wissensaustausch mit den Methoden der Fehleranalyse erfolgen kann, um eine ganzheitliche Ermittlung von Fehlerursachen und Wechselwirkungen zu realisieren.
MA 2	Das Systemmodell muss an das unterschiedliche „Wording“ (z. B. projektspezifisch oder unternehmensspezifisch) leicht angepasst werden können.
MA 3	Elemente müssen standardisiert beschrieben werden.
MA 4	Relationen müssen standardisiert beschrieben werden.
MA 5	Es muss möglich sein, Elemente und Relationen sinnvoll zu attribuieren.
MA 6	Die Wechselwirkung zwischen System und Umwelt soll berücksichtigt werden.

Im folgenden Abschnitt soll anhand der Anforderungen an die Ansätze zur Modellierung der geeignete Ansatz für die MemogaFa ermittelt werden.

2.2.2 Auswahl eines Ansatzes zur Modellierung von Fehlern in der Produktentwicklung

Es gibt unterschiedliche Modellierungssprachen und Ansätze im SE bzw. Model Based Systems Engineering (MBSE). Aus der Fachliteratur und Praxis sind die folgenden Ansätze am meisten bekannt: **Modelica**, **CONSENS** und **SysML**. Folglich werden diese drei Modellierungssprachen untersucht, um ihre Nutzbarkeit für die Methodik der modellbasierten Fehleranalyse zu prüfen (siehe auch Anhang E).

Um mechatronische Systeme physikalisch zu beschreiben, zu berechnen und zu simulieren, eignet sich **Modelica** sehr gut. Allerdings fehlt für die modellbasierte Fehleranalyse, die Beschreibung der Funktionen, welche für die Fehlerdefinition und Fehlerklassifikationen von großer Bedeutung ist (vgl. Kap. 2.1.1.2). Ferner benötigt Modelica Daten zu einzelnen Komponenten oder Teilsystemen, die in den frühen Phasen der PE schwierig zu beschaffen sind. Außerdem kann das Systemmodell ausschließlich „nur“ auf der physikalischen, vorgegebenen Ebene erstellt werden, sodass eine Anpassung des Modells an ein anderes „Wording“ nicht möglich ist.

Die Wechselbeziehungen zwischen Partialmodellen werden in der Wirkstruktur von **CONSENS** anhand physikalischer Grundprinzipien analysiert [Tschirner 2016, S. 61]. Allerdings ist es unklar, ob eine Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen Funktionen, Systemelementen (Komponenten) und Anforderungen in dieser Modellierungssprache vorgesehen ist. Weiterhin ist nicht bekannt, in welcher Form, Informationen aus diesem Systemmodell zielgerichtet für MdF genutzt werden können. Zudem kann das Gesamtmodell aufgrund vieler Partialmodelle und Diagramme unübersichtlich werden.

SysML verfügt über eine eigene Notation, womit Systemelemente attribuiert und Relationen beschrieben werden können. Das Systemmodell wird anhand unterschiedlicher Diagramme (z. B. Struktur-, Verhalten-, Requirements-, Parametrics- und Use-case - Diagramm) charakterisiert [Weilkiens 2007, S.227]. Außerdem sind in SysML die Anforderungs- und Funktionsstruktur sowie eine physikalische Domäne vorgesehen. Die große Anzahl an Diagrammen erlaubt es, das Systemmodell aus unterschiedlichen Blickwinkeln zu betrachten. Zugleich stellt dies auch einen Nachteil bei SysML dar, denn: „Der enorme Umfang an Diagrammen und Konstrukten, deren Verwendung zum Teil nur grob vordefiniert ist, lässt nicht immer eine eindeutige oder gar intuitive Verwendung zu.“ [Dumitrescu 2011, S. 69]. Überdies ist aufgrund umfangreicher Diagramme und Domänen eine aufwändige Einarbeitung in SysML erforderlich [Friedenthal 2009; Dumitrescu 2011]. Des Weiteren ist die Struktur in SysML bereits vorgegeben, sodass eine Anpassung für einen anderen Modellierungszweck (z. B. für die Identifikation potentieller Fehler) nicht möglich ist.

Daher wird der „Radius der Untersuchung“ bezüglich der Modellierung von Fehlern in der PE erweitert, um einen Ansatz zu finden, der eine intuitive Verwendung erlaubt, verständlich ist und an unterschiedliche Ziele der Modellierung angepasst werden kann. Der von Sitte und Winzer entwickelte Ansatz, **Demand Compliant Design (DeCoDe)**, scheint diese Anforderungen zu erfüllen [Winzer und Sitte 2011]. DeCoDe ist ein Ansatz zur standardisierten Beschreibung eines technischen Systemmodells basierend auf den Grundsätzen des systemischen Denkens und Handelns [Winzer 2016]. Realisiert wird DeCoDe mithilfe der DeCoDe-Hauptmatrix, die eine strukturierte Erfassung von Informationen und Daten über das System ermöglicht. Zugleich erschafft die Matrix durch ihre Strukturierungsvorschriften von systemspezifischen Daten und Informationen⁶, die Grundlagen für ein konsistentes Systemmodell, welches systematisch analysiert werden kann. Dabei werden alle charakteristischen Domänen der PE im DeCoDe Ansatz als „Sichten“ auf das System mitberücksichtigt.

⁶ Information ist „eine Menge verknüpfter Daten, die für den Menschen in der gegebenen Situation und bei gegebenem Kontext eine Bedeutung haben“ [Braunholz 2006, S. 14].

Im Kontext zu DeCoDe sind mit Sichten die Anforderungen, Komponenten, Funktionen und Prozesse eines Systems gemeint. Die Erläuterung zu den einzelnen DeCoDe-Sichten ist aus der Tabelle 5 zu entnehmen.

Tabelle 5: Erläuterung der Systemsichten [in Anlehnung an Winzer 2016, S. 130]

Sichten	Erläuterung
Anforderung	Anforderungen sind Erfordernisse oder Erwartungen von Stakeholdern an ein System, welche festgelegt, üblicherweise vorausgesetzt oder verpflichtend sind.
Funktion	Funktionen beschreiben den Zweck bzw. die Aufgabe, die ein System zu erfüllen hat. Sie geben damit der Umwandlung von Eingaben in Ausgaben eines Systems eine Zielrichtung. Dadurch ermöglichen Funktionen eine Beschreibung des „Was“ ein System oder Teile davon realisieren sollen.
Prozess	Prozesse beschreiben, wie die Eingaben eines Systems in Ausgaben umgewandelt werden, also das „Wie“. Über den Prozess realisiert sich die eingebaute Funktionalität des Systems, d.h. innerhalb von Prozessen werden bei technischen Systemen durch die Nutzung von Komponenten Funktionen umgesetzt. Erfolgt die Einbindung von Menschen in Prozesse, werden letztere oftmals auch als Arbeits- oder Geschäftsprozesse bezeichnet (Prozess eines soziotechnischen Systems).
Komponente	Komponenten sind physische oder logische, einzelne oder zusammengefasste Bestandteile eines Systems.

Die vier Sichten werden in der DeCoDe-Hauptmatrix gegenübergestellt und abhängig von der Zielstellung der Modellierung vernetzt (vgl. Abbildung 14).

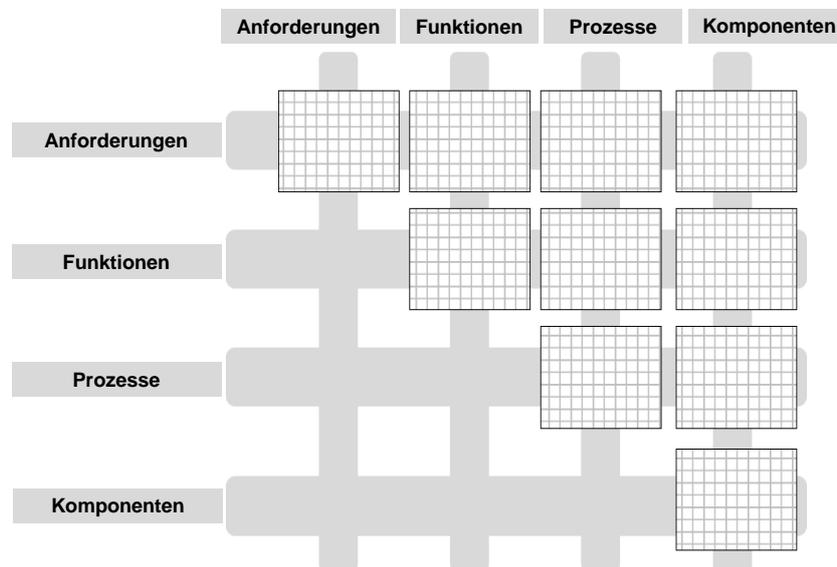


Abbildung 14: DeCoDe-Hauptmatrix mit den vier DeCoDe-Sichten [in Anlehnung an Winzer et al. 2011 und Ott 2009]

Die zielgerichtete Vernetzung der vier Sichten eröffnet eine multidimensionale Perspektive auf das Gesamtsystem, die eine Untersuchung des Systems auf Wechselwirkungen (gegenseitige Beein-

flussungen) erlaubt [Ott 2009; Winzer und Sitte 2011]. Diese „Multidimensionalität“ wird in einer sogenannten Multi Domain Matrix (MDM) praktisch realisiert. Eine MDM ist eine der drei Arten von Matrizen aus der matrizenbasierten Modellierung. Die Arten der Matrizen sind wie folgt definiert:

- Domain Structure Matrix (DSM); beschreibt die Vernetzung innerhalb einer Sicht (z. B. innerhalb der Komponenten-Komponenten Matrix kann die Komponentenstruktur beschrieben werden),
- Domain Mapping Matrix (DMM); beschreibt die Vernetzung zwischen zwei Sichten (z. B. die Komponenten-Prozesse Matrix beschreibt die Beziehung zwischen Komponenten und Prozessen) und
- Multi Domain Matrix (MDM); beschreibt eine multidimensionale Sicht auf das Gesamtsystem, indem alle Sichten mit deren Systemelementen und Relationen abgebildet werden [Lindemann 2009].

Die Unterscheidung zwischen den Arten der Matrizen innerhalb der DeCoDe-Matrix wird in Abbildung 15 visualisiert.

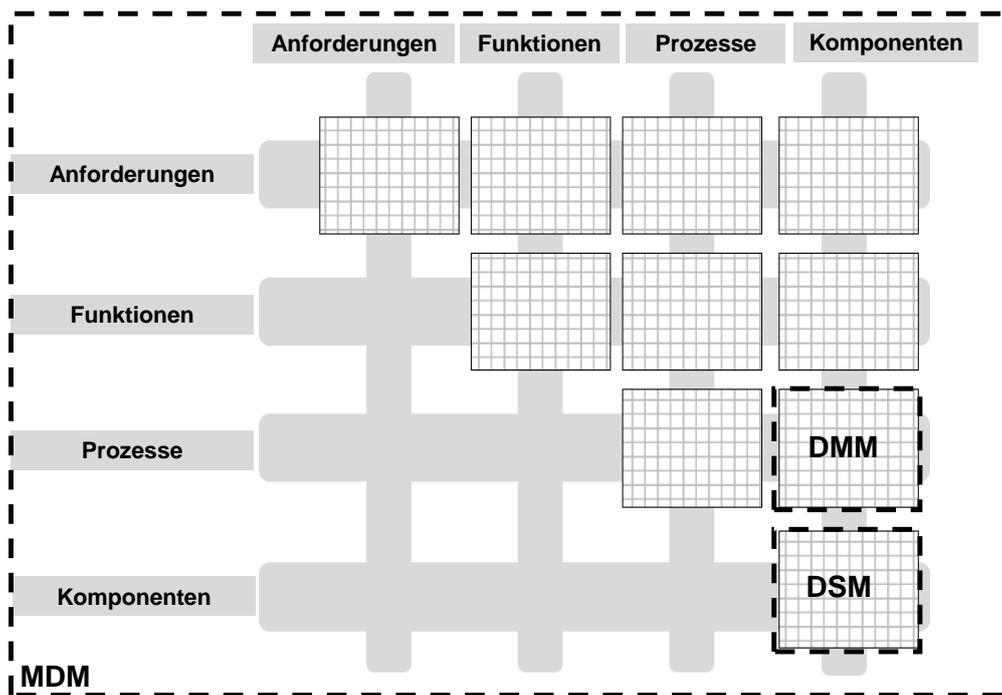


Abbildung 15: Die drei Arten der Matrizen innerhalb der DeCoDe-Hauptmatrix [Eigene Darstellung in Anlehnung an Winzer et al. 2011 und Ott 2009]

Aufgrund seiner matrizenbasierten Struktur ist das DeCoDe-Systemmodell problemspezifisch anpassbar und ermöglicht einen Informationsaustausch zwischen dem Modell und den unterschiedlichen Methoden der Fehleranalyse. Dies wurde bei mehreren Forschungsprojekten und Dissertationen belegt, hierfür einige Beispiele:

- Kopplung des DeCoDe-Systemmodells mit der FMEA [Ott 2009],
- Kopplung des DeCoDe-Systemmodells mit dem Ishikawa Diagramm [Mamrot 2014] und
- Kopplung des DeCoDe-Systemmodells mit MdF (bspw. FMECA, FTA und RBD) im Rahmen der Bearbeitung unterschiedlicher Forschungsprojekte (z. B. K-VEC⁷ und Q-ELF⁸).

Mithilfe der Anforderungen aus Tabelle 6 ergibt sich die folgende Bewertung für die beschriebenen Ansätze und Modellierungssprachen.

Tabelle 6: Bewertung der untersuchten Ansätze für die Modellierung von Produktsystemen anhand der Anforderungen aus den Forschungsfragen und in Bezug auf deren Anwendbarkeit für die modellbasierte Fehleranalyse

Nr.	Anforderungen an die Ansätze	Ansatz und Modellierungssprachen			
		Modelica	SysML	CONSENS	DeCoDe
2 = Anforderung erfüllt 1 = Anforderung zum Teil erfüllt 0 = Anforderung nicht erfüllt MA=Modellierungsanforderung					
MA 1	Das Systemmodell muss so gestaltet sein, dass ein Wissensaustausch mit den Methoden der Fehleranalyse erfolgen kann, um eine ganzheitliche Ermittlung von Fehlerursachen und Wechselwirkungen zu realisieren.	1	1	0	2
MA2	Das Systemmodell muss an das unterschiedliche „Wording“ (z. B. projektspezifisch oder unternehmensspezifisch) leicht angepasst werden können.	0	0	0	0
MA 3	Elemente müssen standardisiert beschrieben werden.	2	2	2	2
MA 4	Relationen müssen standardisiert beschrieben werden.	1	1	2	2
MA 5	Es muss möglich sein, Elemente und Relationen sinnvoll zu attribuieren.	1	2	1	2
MA 6	Die Wechselwirkung zwischen System und Umwelt soll berücksichtigt werden.	0	2	1	1
Σ		5	8	6	9

⁷ Im Rahmen des Projekts K-VEC („Key-Vehicle: Ultrafast and distributed power charge system for high performance on-board energy storage devices“) wurde ein Systemkonzept erarbeitet und zur Prototypenreife gebracht, bei dem im ÖPNV durch Nutzung von Hochleistungskondensatoren in Bussen und dezentralen Ladestationen in der Fahrbahn Elektromobilität realisiert werden kann. Das Fachgebiet ProQ übernahm dabei im Teilvorhaben des Projekts die Risikoanalyse. Hierbei wurden insbesondere die Aspekte, Funktionsfähigkeit und Risiken des Systems betrachtet und mit entsprechenden Methoden, Maßnahmen und Fehlervermeidungsstrategien erarbeitet. Förderkennzeichen DLR-PT, FKZ 01MX12020; vgl. <http://www.kvec.eu>

⁸ Q-ELF: Das Projekt Q-ELF („Qualitätsorientierter Methodenworkflow für die Produktentwicklung eines Linearantriebs in der Fördertechnik“) wurde von der DFG gefördert und durch die Lehrstühle Produktsicherheit und Qualitätswesen (Förderkennzeichen WI 1234-11/1) der Bergischen Universität Wuppertal und Elektrische Antriebe und Mechatronik (Förderkennzeichen KU 1307/12-1) der Technischen Universität Dortmund durchgeführt.

Der Bewertung in Tabelle 6 zufolge, ist der DeCoDe Ansatz ist für das angestrebte (Teil-)Ziel in dieser Arbeit am besten geeignet (vgl. Tabelle 6). Dementsprechend wird DeCoDe als Systemmodell mit standardisierten Sichten und Relationen für die Erarbeitung der spezifischen Modellierung der neuen Methodik verwendet. Vor dem Hintergrund der spezifischen Modellierung ist es vorteilhaft, die wesentlichen Bestandteile eines Modells (Systemelemente, Relationen und deren Attribuierungen) vertieft zu betrachten. Dies erfolgt im kommenden Abschnitt.

2.2.3 Spezifische Systemelemente, Relationen und Attribuierungen für das Modell der neuen Methodik

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, eine **modellbasierte** und ganzheitliche Fehleranalysemethodik für die PE zu entwickeln. Die Methodik soll für technische Produktsysteme Anwendung finden, welche (wie bereits dargelegt) als Modell abgebildet werden sollen, damit Fehler besser lokalisiert und genauer beschrieben werden können. Um ein konsistentes Modell zu generieren, bedarf es zunächst einer Festlegung bezüglich der **Systemelemente, ihrer Relationen und Attribuierungen**.

Spezifische Systemelemente und deren Attribuierungen

Die heute bekannte Domäne der PE haben ihre Wurzeln in der Denkweise von Suh aus dem Werk „Axiomatic Design Theory for Systems“, das bereits 1998 erschienen ist. Suh beschreibt darin eine strukturierte Vorgehensweise für die PE, beginnend mit der Erhebung der Kundenanforderungen (Customer domain), welche in die funktionalen Anforderungen (Functional Requirements (FRs)) aus der funktionellen Domäne (Functional domain) „umgeschrieben“ werden. Die Funktionen werden in die physikalischen Elemente aus der physikalischen Domäne umgesetzt, die einen Entwurfparameter beinhalten (Design Parameters (DP)). Aus den physikalischen Domänen werden die Prozessvariablen (PVs) abgeleitet. Mit Prozessen meint Suh in diesem Zusammenhang, die erforderlichen Produktionsprozesse für die Umsetzung der physikalischen Domäne (vgl. Abbildung 16).

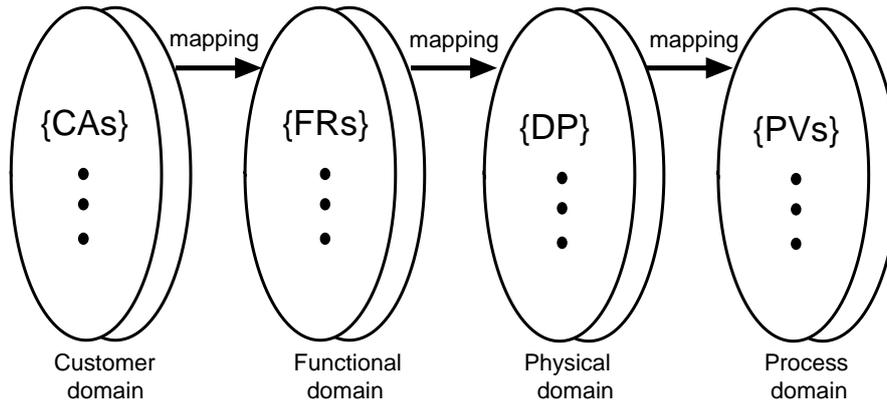


Abbildung 16: Axiomatic Design [in Anlehnung an Suh 1998]

Diese Sichtweise sowie die Darstellung der Domänen in Form von Designmatrizen werden im DeCoDe-Ansatz übernommen. Wie oben beschrieben, werden die Domänen in der DeCoDe-Sprache als Sichten bezeichnet. Ferner sind die Systemelemente Bestandteile der DeCoDe-Sichten. Die Systemelemente können laut Sage und Rouse [Sage und Rouse 1999] beliebig attribuiert werden (vgl. Abbildung 17).

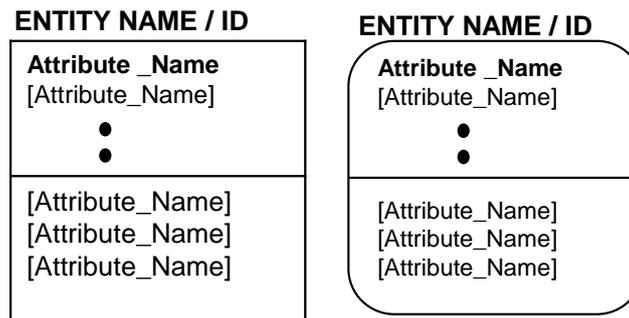


Abbildung 17: Beschreibung eines Systemelements [in Anlehnung an Sage und Rouse 1999, S. 437]

Die Notation für die Attribuierungen von Systemelementen aus Abbildung 17 ist oft in der Fachliteratur vertreten, wie beispielsweise in der Dissertation von Brudniok [Brudniok 2007], in der er eine Funktion am Beispiel eines Antriebsstrangs für ein Gelenk mithilfe beliebig vieler Eigenschaften detailliert beschreibt (vgl. Abbildung 18).

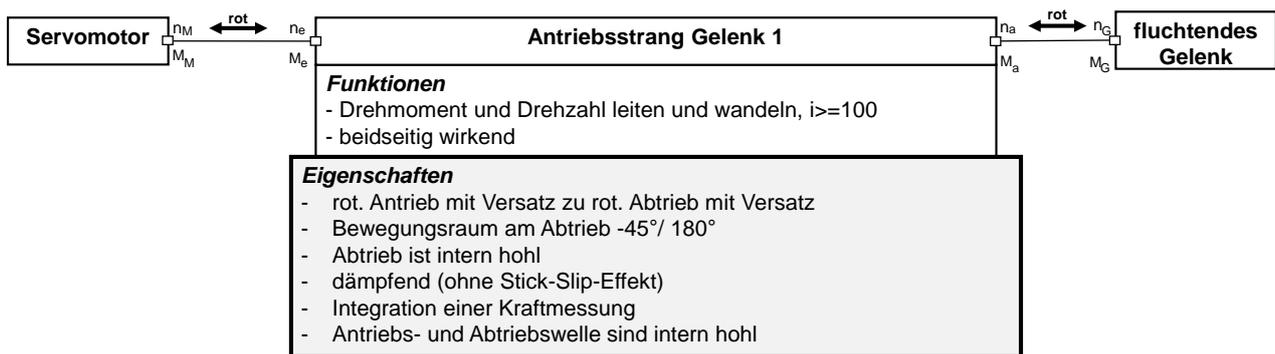


Abbildung 18: Funktionsbeschreibung am Beispiel eines Antriebsstrangs für ein Gelenk [in Anlehnung an Brudniok 2007, S. 187]

Aus der Abbildung ist erkennbar, dass keine festgelegte Syntax für die Beschreibung der Funktionseigenschaften (Attribute) vorhanden ist. Es werden alle relevanten Eigenschaften aufgelistet, die die beschriebene Funktion „Drehmoment und Drehzahl leiten und wandeln“ näher spezifizieren.

Im Hinblick auf die Attribuierung von Komponenten (der physikalischen Domäne) gibt es in der Fachliteratur umfangreiche Listen mit Attributen und physikalischen Eigenschaften von Komponenten. Diese können sich bspw. auf die Geometrie (Abmaßen, Dimensionen, Bauraum, Anordnung usw.) oder auf die Mechanik (Gewicht, Last, Kräfte, Reibung usw.) beziehen [vgl. Feldhusen et al. 2013, S. 331].

Spezifische Relationen von Systemelementen

Die Relationen repräsentieren die Beziehungen zwischen den Systemelementen in einem Systemmodell. Dabei gibt es zwei Arten von Beziehungen: unidirektional (Systemelement A beeinflusst Systemelement B) und bidirektional (Systemelement A und Systemelement B beeinflussen sich gegenseitig).

Nach den DeCoDe-Prinzipien können alle vier DeCoDe-Sichten anhand von standardisierten Relationen vernetzt werden (vgl. Abbildung 19). Auf Basis dieser Vernetzungen eröffnet sich die Perspektive für eine ganzheitliche Betrachtung des zu untersuchenden Systems.

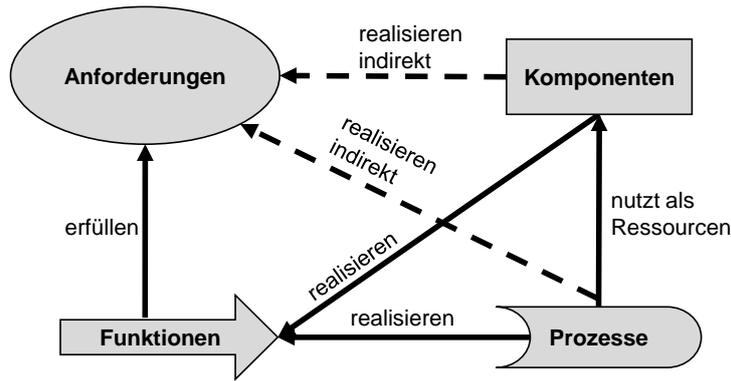


Abbildung 19: Beschreibung der Relationen zwischen den DeCoDe-Sichten [in Anlehnung an Schlund 2011, S. 75]

Die Vernetzung erfolgt matrixbasiert, indem die Sichten in der DeCoDe-Hauptmatrix gegenübergestellt werden (vgl. Abbildung 14). Auf diese Weise werden Abhängigkeiten, Wechselbeziehungen und gegenseitige Beeinflussungen innerhalb und zwischen den vier Domänen visualisiert. In der Modellierung mit DeCoDe ist vorgesehen, dass pro Relation eine Matrix gebildet wird. Wenn das Ziel darin besteht, eine Komponentenhierarchie zu erstellen, dann bedeutet die Notation der Relation zwischen den Komponenten in dieser Matrix „ist Teil von“. Dies bedeutet, dass eine Komponente „Teil von“ einem Subsystem ist, das wiederum „Teil vom“ Gesamtsystem ist. Zudem kann die erstellte Hierarchie sowohl als Matrix als auch als Graph visualisiert werden (vgl. Abbildung 20).

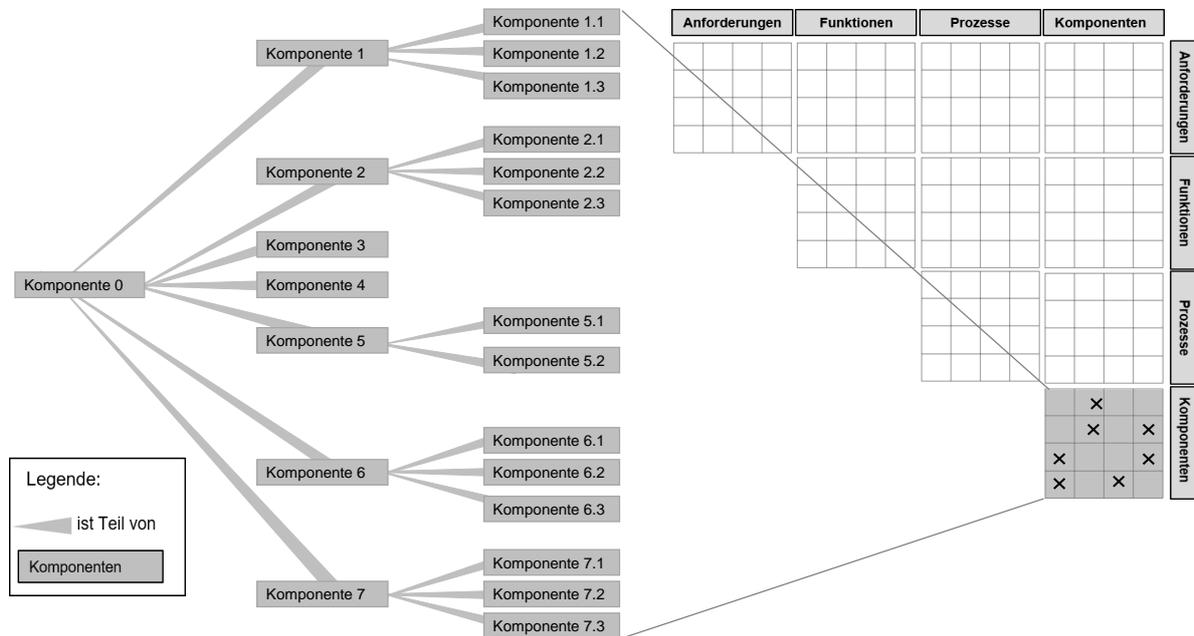


Abbildung 20: Prinzipdarstellung einer Komponentenhierarchie abgebildet in einer Matrix [Eigene Darstellung]

In der Regel gibt es in der PE drei Arten von Relationen, welche als die drei Hauptflüsse eines technischen Systems betrachtet werden: Energie-, Stoff- und Signalfluss. Die Eigenschaften dieser drei Hauptflüsse sind sehr vielfältig und können beliebig erweitert werden. Hierzu einige Beispiele:

Energie: mechanische, thermische, elektrische, chemische, optische Energie, aber auch Kraft, Strom, Wärme ...

Stoff: Gas, Flüssigkeit, feste Körper, Staub, aber auch Rohprodukt, Material, Prüfgegenstand, Behandlungsobjekt, Endprodukt, Bauteil, geprüfter oder behandelter Gegenstand ...

Signal: Messgröße, Anzeige, Steuerimpuls, Daten, Informationen ...“ [Feldhusen et al. 2013, S. 241].

Theoretisch lassen sich alle drei Hauptflüsse mit deren Eigenschaften innerhalb einer Komponenten-Komponenten Matrix (physikalische Domäne) mithilfe der Modellierung abbilden, wie in Abbildung 21 illustriert wird.

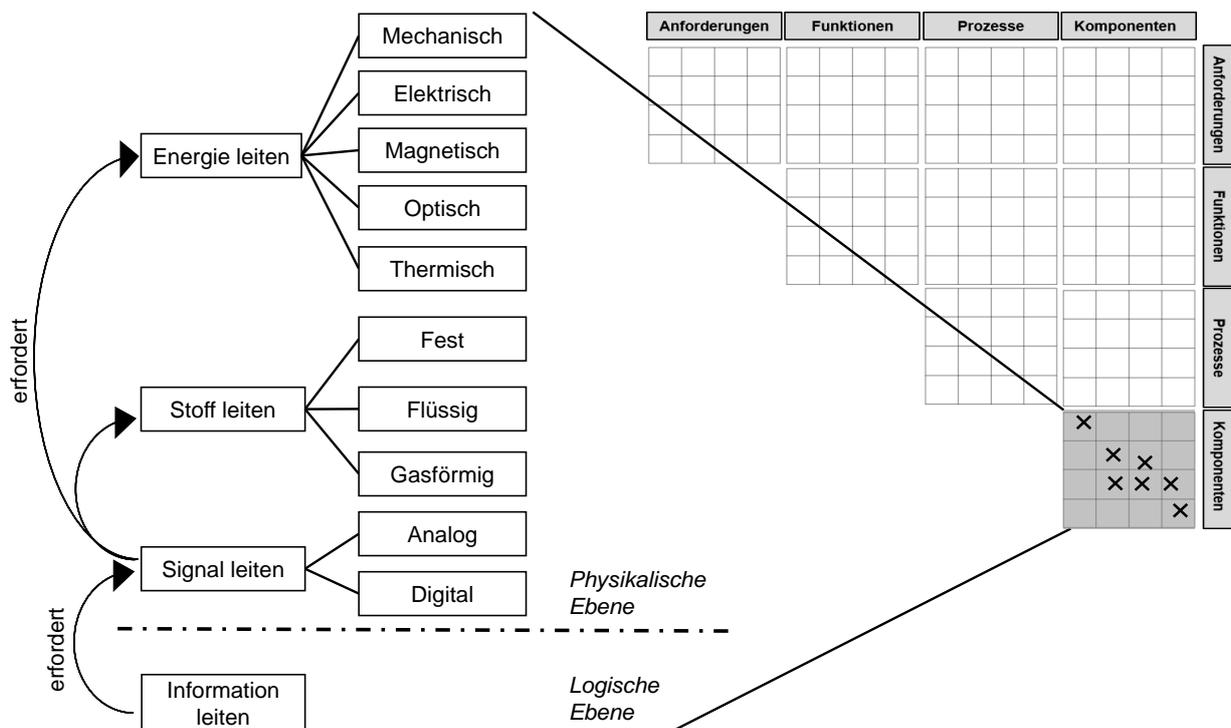


Abbildung 21: Möglichkeiten der Beschreibung der Relationen innerhalb der Komponenten-Sicht/ physikalische Domäne [Eigene Darstellung in Anlehnung an Breidert 2007, S. 37 und Feldhusen et al. 2013, S. 41]

In Abbildung 21 ist erkennbar, dass die drei Hauptflüsse (die logische Ebene wird nicht betrachtet, da sie nicht physikalisch ist) anhand von Eigenschaften konkret und vielfältig beschrieben werden können. Auf diese Weise kann der Hauptfluss mit der Relation „Energie leiten“, Eigenschaften wie mechanisch, elektrisch, magnetisch oder thermisch haben. Somit können unterschiedliche Formen

der Energie, bezogen auf die Zielstellung modelliert werden. Die Notation dafür ist wie folgt zu gestalten: Die Relation „Energie leiten“ wird um das Adjektiv (oder Eigenschaft) „*elektrisch*“ ergänzt und es entsteht eine neue Relation: „*elektrische* Energie leiten“. Dadurch kann die Beschreibung der Relation an die verschiedenen Disziplinen angepasst werden (bspw. „elektrische Energie leiten“ für die Disziplin der Elektrotechnik oder „digitales Signal leiten“ für die Softwareentwicklung). Allerdings, um die Zusammenarbeit verschiedener Disziplinen der PE zu fördern, muss folgende Frage beantwortet werden: Wie kann eine gemeinsame Sichtweise auf das System geschaffen werden?

Die Lösung liegt in der Nutzung eines gemeinsamen Systemmodells, das alle Sichtweisen vereinigt und die Basis für ein gemeinsames Systemverständnis und eine effizientere Zusammenarbeit bildet [Winzer 2016; Haberfellner 2012]. Die unterschiedlichen, fachspezifischen Sichtweisen können innerhalb einer MDM als „sich überlagernde Strukturen“ transparent dargestellt werden, da die MDM alle modellierten Systemelemente mit deren Relationen beinhaltet (vgl. Abbildung 22).

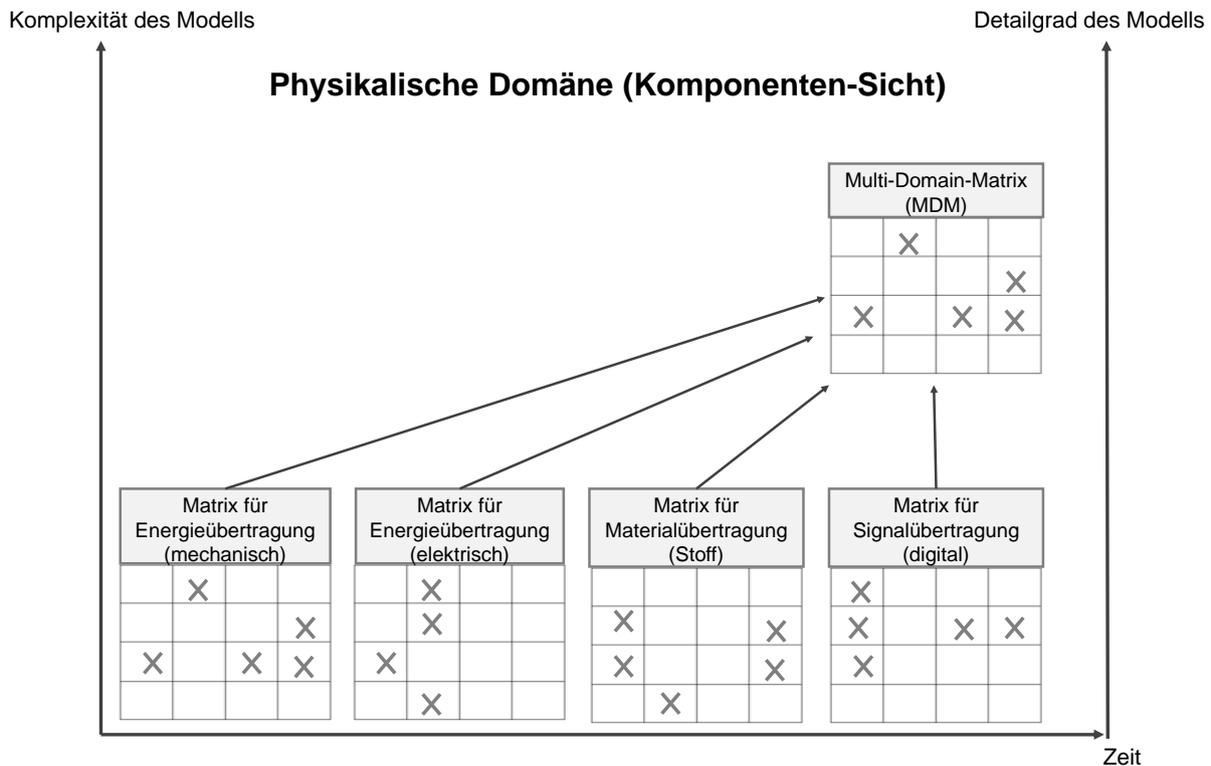


Abbildung 22: Möglichkeiten der Modellierung von Relationen innerhalb der physikalischen Domäne (Komponenten-Sicht) [Eigene Darstellung]

Abbildung 22 veranschaulicht, wie die einzelnen Matrizen bezogen auf einzelne Eigenschaften der drei Hauptflüsse in einer MDM zusammen abgebildet werden können. Dies eröffnet neue Möglichkeiten und Perspektiven für die Fehleranalyse, da die Sichten und Relationen des Systemmodells sowohl getrennt als auch zusammen (multidimensional) betrachtet und analysiert werden können. Zudem bereitet diese vielfältige Betrachtungsweise auf das Gesamtsystem den Boden für einen

zielgerichteten, bidirektionalen Informationstransfer zwischen dem Systemmodell und den Methoden der Fehleranalyse. Doch für die Erstellung eines konsistenten und nutzbaren Systemmodells bedarf es bestimmter Regeln der Modellierung, sodass es für den Anwender nützlich und nachvollziehbar ist. Diese werden im folgenden Kapitel vorgestellt.

2.2.4 Regeln der Modellierung

Die Regeln der Modellierung sind für die Erstellung eines validen Systemmodells essenziell, da diese dazu verhelfen, die Komplexität des erstellten Systemmodells zu reduzieren, u. a. indem Doppelungen der Systemelemente und Relationen vermieden werden. Zudem wird mithilfe dieser Regeln Transparenz erschaffen, z. B. durch die Strukturierung der Sichten (vgl. Komponentenstruktur).

In der Regel beginnt die Modellierung mit der Bestimmung der Systemgrenze. Dabei wird der zu untersuchende „Gegenstand“ von seiner Umgebung isoliert, damit er besser analysiert werden kann. Im nächsten Schritt der Modellierung werden die einzelnen Strukturen der DeCoDe-Sichten erstellt. Dafür wird eine festgelegte Notation in Form einer Ordnungsbeziehung verwendet (siehe Abbildung 23).

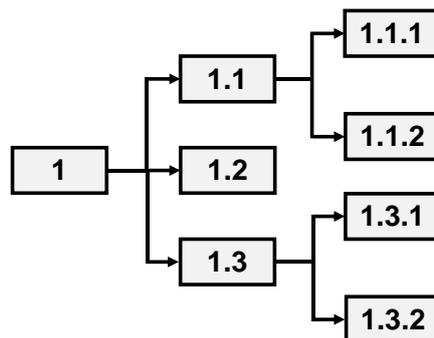


Abbildung 23: Ordnungsbeziehung [in Anlehnung an Echterhoff 2016, S. 11]

Die hierarchische Zuordnung unterliegt einer formalen Ontologie, wie Abbildung 24 rechts aufzeigt. Schmalenbach [Schmalenbach 2013] nutzt diese formale Ontologie zur Konzeptualisierung einer Komponentenhierarchie (vgl. Abbildung 24).

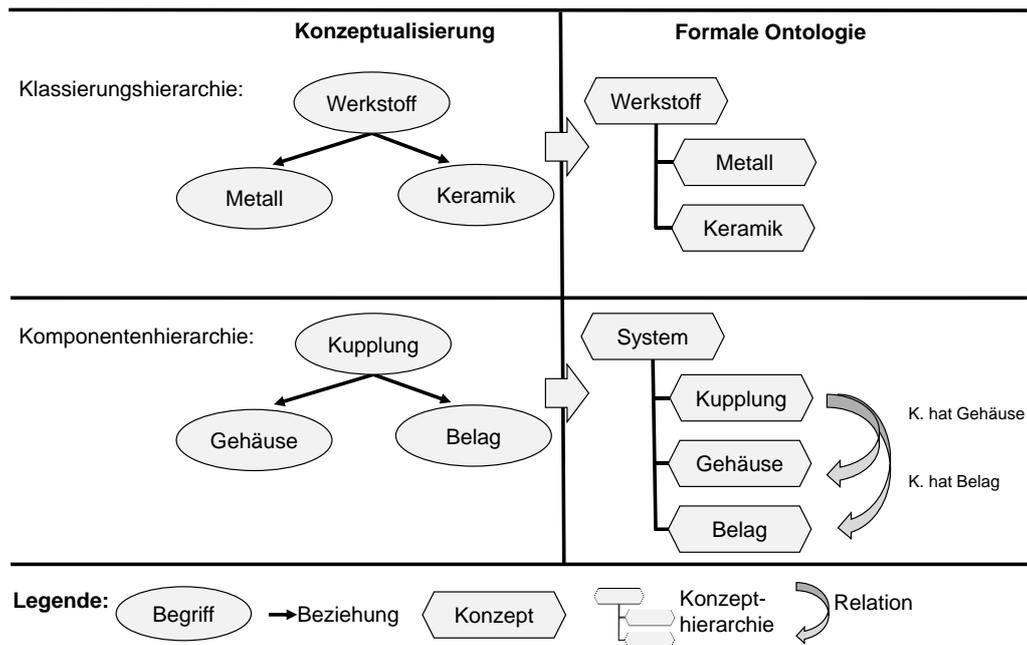


Abbildung 24: Formale Ontologie für die Komponentenhierarchie
 [in Anlehnung an Schmalenbach 2013, S. 105]

Nachdem die Strukturen oder Hierarchien der DeCoDe-Sichten erstellt sind, erfolgt eine zielgerichtete Vernetzung innerhalb der Sichten sowie Sichten übergreifend. Für die Herangehensweise zur Vernetzung der unterschiedlichen Domänen hat Riekhof [Riekhof et al. 2013] einen Leitfaden in Form von Gestaltungsleitsätzen erstellt (vgl. Anhang E). Basierend auf Erfahrungen aus der Modellierung von technischen Systemen in den Forschungsprojekten K-VEC (Detailerläuterung siehe Kapitel 4.1) und Q-ELF (Detailerläuterungen siehe Kapitel 4.2) werden die erwähnten Gestaltungsleitsätze um weitere drei Sätze ergänzt:

- Das Ziel der Modellierung soll vor der Modellierung festgelegt werden.
- Die Anzahl der Systemelemente und Relationen ist abhängig von der Problem- und Zielstellung der Modellierung zu bestimmen; dabei gilt es, je größer diese Anzahl, desto höher die Komplexität des Systemmodells (vgl. Abbildung 11).
- Systemelemente und Relationen sollen nach festgelegten Notationen modelliert werden.

Der Inhalt der Tabelle 7 ist eine Zusammenfassung der Arbeitsergebnisse aus Forschungsprojekten (z. B. DFG-Projekte Q-ELF [Riekhof et al. 2012] und KAUSAL [Schlüter et al. 2018]) sowie Dissertationen und Fachliteratur zum Thema Modellierung [vgl. Schlund 2011; Nicklas 2016; Mamrot 2014]. Die DeCoDe-Elemente, Relationen sowie deren Attribute werden in Tabelle 7 umfangreich beschrieben. Daher bietet diese Tabelle eine gute Hilfestellung für eine Modellierung mit standardisierten Sichten und Relationen nach dem DeCoDe-Ansatz. Die vollständige Tabelle befindet sich im Anhang A.

Tabelle 7: Auszug aus standardisierter Beschreibung und Notationen von DeCoDe-Systemelementen, Relationen und Attributen [Eigene Darstellung in Anlehnung an Nicklas 2016; Mamrot 2014; Riekhof et al. 2013; Schlund 2011; Ott 2009; Feldhusen et al. 2013]

DeCoDe-Systemelemente (Symbole) und Relationen	Attribute/ Merkmale/ Parameter/ Beschreibung
Arten von Sichten	
 Anforderungen	Kategorien: <ul style="list-style-type: none"> • Sicherheitsanforderungen, • Funktionale Anforderungen, • Nicht funktionale Anforderungen (z. B. Gesetze und Normen), • Umwelanforderungen (Anforderungen aus dem Umfeld des Systems), • ...
 Funktionen	Arten von Funktionen: <ul style="list-style-type: none"> • Hauptfunktion, • Nebenfunktion [vgl. Feldhusen et al. 2013] und • Störfunktion [vgl. Riekhof 2013].
 Prozesse	Arten von Prozessen: <ul style="list-style-type: none"> • Produktionsprozesse, • Fertigungsprozesse, • Nutzungsprozesse, •
 Komponenten	Attribuierung von Komponenten [nach Feldhusen et al. 2013]: <ul style="list-style-type: none"> • Material, • Gewicht, • Dimension, •
.....

2.2.5 Zwischenfazit

Um eine konsistente und effiziente Modellierung zu realisieren, werden an die Modellierung selbst sowie an das Modell, Anforderungen gestellt. Aus den Forschungsfragen im Kapitel 1.2 und den oben beschriebenen Notationen und Regelungen der Modellierung, ergeben sich zusammengefasst zwei Anforderungen an die Modellierung sowie an das Modell eines Produktsystems.

Tabelle 8: Abgeleitete Anforderungen aus Modellen, Modellierungssprachen und Regeln

Nr.	Anforderungen abgeleitet aus Modellen, Modellierungssprachen und Regeln
A4	Die Modellierung soll nach bestimmten Gestaltungsleitsätzen, Regeln und Notationen erfolgen.
A5	Das Systemmodell soll aus einheitlichen Systemelementen, Relationen und Attributen bestehen.

Somit sind zu den Anforderungen, die sich aus der Vielfältigkeit der Fehlerdefinitionen ergeben, noch zwei weitere Anforderungen aus Sicht der Modellierung an MemogaFa hinzugekommen. Anhand der Umsetzung dieser Anforderungen soll ein fundiertes Systemmodell entstehen, das die Basis für eine ganzheitliche Fehlerbeschreibung bildet. Dafür ist festzulegen, wie Fehler gemäß Kapitel 2.1 umfassend zu beschreiben sind, sowie welche Informationen die Beschreibung beinhalten soll. Dies bildet den Kern des nächsten Kapitels.

2.3 Fehlerbeschreibung und Informationen



Bezüglich der Fehlerbeschreibung und der dafür benötigten Informationen sind die Gestaltungsleitsätze und Regeln der Modellierung, wie sie im Kapitel zuvor vorgestellt wurden, zu beachten, damit die Menge an Informationen „beherrschbar“ wird. Dafür wird für den Umgang mit Informationen der Leitsatz „vom Groben zum Detail“ nach Winzer appliziert [Winzer 2016, S. 250]. Zunächst wird eruiert, welche Aspekte und Informationen eine Fehlerbeschreibung auf grober Modellierungsebene enthalten sollte (Kapitel 2.3.1), bevor nachfolgend auf die Anforderungen für eine Detailebene eingegangen wird (Kapitel 2.3.2).

2.3.1 Fehlerbeschreibung und Informationen auf grober Ebene

Für die modellbasierte und **ganzheitliche** Fehleranalyse sind alle relevanten Systemelemente, Umweltfaktoren und Ereignisse in „einem Spannungsfeld“ der Wechselwirkungen gegenüberzustellen, um Fehlerkombinationen sichtbar zu machen. Folglich sind vier Aspekte, die im weiteren Verlauf als Felder bezeichnet werden, relevant:

- Feld mit den Komponenten und Funktionen, die die Nutzungsprozesse des Produkts realisieren,
- Feld mit Ereignissen, die im Nutzungsprozess auftreten können,
- Feld mit Umweltfaktoren, die den Nutzungsprozess beeinflussen können und
- Feld mit Effekten, die aus der Wechselwirkung von Funktionen, Komponenten, Umweltfaktoren oder Ereignissen entstehen können.

Die Komponenten und Funktionen ergeben sich aus den zu modellierenden Sichten (Domäne) der PE. Dabei werden festgelegte Funktionen durch die entsprechenden Komponenten realisiert.

Das Feld der Ereignisse ergibt sich aus der angestrebten Nutzung des zu entwickelnden Systems. So sind bereits in der PE ein Missbrauch des Systems in der Nutzungsphase oder mögliche unerwarteten Ereignisse (z. B. Unfall) mit zu berücksichtigen. All diese Aspekte können als Ereignisse verstanden werden, die Fehler (mit) auslösen.

Das Feld der Umweltfaktoren ergibt sich aus der Forderung der Ganzheitlichkeit und der dynamischen Systemgrenzen. Nur durch die Berücksichtigung außerhalb einer Systemgrenze liegender Einflussfaktoren, kann eine Fehlerbeschreibung umfassend erfolgen.

Das Feld mit den Effekten resultiert aus möglichen Wechselwirkungen zwischen Komponenten, Funktionen, Ereignissen und Umweltfaktoren. Zudem ist der Effekt das Bindeglied zwischen der Ursache und Wirkung eines Fehlers (vgl. Abbildung 8). Dabei können verschiedene Arten von Effekten in unterschiedlichen Formen entstehen: mechanisch, elektrisch, magnetisch, elektromagnetisch usw. [vgl. Breidert, S. 39].

Eine genaue Beschreibung dieser vier Felder sowie deren Herleitung und Wichtigkeit für die Methodik wird im Kapitel 3 erläutert. Auf Basis dieser groben Felder können konkretere Informationen auf Detailebene erfasst werden. Welche Anforderungen diese Detailbeschreibung zu erfüllen hat, wird in folgendem Kapitel 2.3.2 dargelegt.

2.3.2 Fehlerbeschreibung und Informationen auf detaillierter Ebene

Die Informationen zur Fehlerbeschreibung aus **der groben Ebene** sollen mithilfe der Ergebnisse zu **Fehlerdefinitionen, -arten und -klassifizierungen** (vgl. Kapitel 2.1.1) auf eine **detaillierte Ebene** „überführt“, **konkretisiert und umfassend beschrieben werden**.

Dafür sollen die Ergebnisse aus den Kapiteln 2.1.1 und 2.3.1 kondensiert und synthetisiert in die ganzheitliche Beschreibung einer Fehlerentstehung einfließen, um eine detaillierte und fundierte Fehlerbeschreibung zu realisieren (vgl. Abbildung 25). Dabei werden die unterschiedlichen „Sichten“ der vorhandenen Definitionen zum Begriff „Fehler“ mitberücksichtigt und vereinheitlicht.

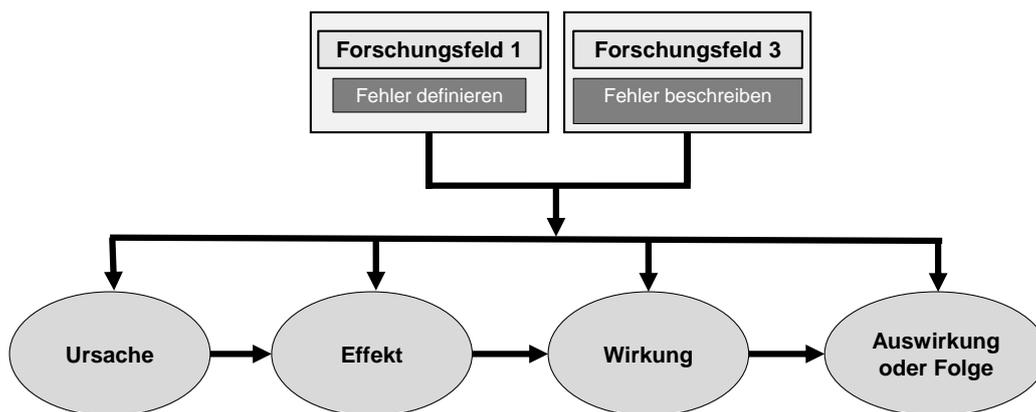


Abbildung 25: Ganzheitliche Beschreibung einer Fehlerentstehung [eigene Darstellung in Anlehnung an Westkämper 1997; Zingel 2013, S. 50]

Somit wird die Essenz aus der Literaturanalyse im Kapitel 2.1.1 in die Detailebene der Fehlerbeschreibung integriert. Dementsprechend werden bezüglich der detaillierten Fehlerbeschreibung folgende Inhalte gefordert:

1. Allgemeine Informationen (Datum, Nutzer, Versionsstand usw.),
2. Fehlerursachen (z. B. Funktionsausfall, Komponentenausfall, Nichterfüllung von Anforderungen usw.),
3. Fehlerauswirkungen (z. B. in Form eines physikalischen Effekts) sowie
4. Fehlerrisiko (Häufigkeit des Auftretens eines Fehlers in Abhängigkeit zur Schadensschwere).

Der erste Bereich soll allgemeine Informationen (z. B. Szenario-ID, Szenario Beschreibung, Versionsstand) beinhalten. Die Ursache, Wirkung und Auswirkung oder Folgen einer Fehlerentstehung (vgl. Abbildung 25) sollten die Strukturen der nächsten Bereiche zur Fehlerbeschreibung bestimmen. Im Zusammenhang mit der Auswirkung oder Folge eines Fehlers soll das Fehlerrisiko ermittelt werden. Das Fehlerrisiko wird durch Häufigkeit und Schadensschwere definiert. Diese zwei Dimensionen bilden die sogenannte Risikomatrix, die oft in der Literatur empfohlen und beschrieben wird [vgl. VDA 2000; Bertsche 2009]. Anhand der Risikomatrix können unterschiedliche Fehler priorisiert werden.

2.3.3 Zwischenfazit

Bezüglich der Fehlerbeschreibung und damit einhergehenden Informationen, ergeben sich noch weitere Anforderungen, die durch MemogaFa zu erfüllen sind.

Tabelle 9: Anforderungen abgeleitet aus der Fehlerbeschreibung

Nr.	Anforderungen abgeleitet aus der Fehlerbeschreibung
A6	Betrachtung der Felder „Komponenten“, „Funktionen“, „Ereignisse“ und „Effekte“ sowie „Umweltfaktoren“ bei der Fehlerbeschreibung auf grober Ebene
A7	Verarbeitung von Informationen bezüglich „Allgemeine Informationen“, „Fehlerarten“, „Fehlerursachen und Fehlerauswirkungen“ sowie „Fehlerrisiko“

Somit bleibt für den Stand der Technik abschließend die Durchführung einer Analyse der eingesetzten MdF in der PE. Hierbei ist einerseits zu hinterfragen, welche Anforderungen die betrachteten Methoden noch zusätzlich an die neue Methodik stellen. Andererseits ist zu prüfen, inwiefern die betrachteten Methoden in die neue Methodik integrierbar sind. Diese Analyse erfolgt im nachfolgenden Kapitel.

2.4 Analyse der Methoden der Fehleranalyse in der Produktentwicklung



Eine Methode ist definiert als ein „planmäßiges Vorgehen in einer Abfolge von Tätigkeiten zum Erreichen eines bestimmten Ziels. Methoden können sowohl bewusst als auch unbewusst entstehen und ablaufen bzw. angewandt werden“ [Ehrlenspiel und Meerkamm 2013, S. 748]. Um das Produkt und die Prozesse robust und sicher

zu gestalten, werden im Rahmen der PE unterschiedliche Methoden eingesetzt. In Abbildung 26 wird der Vollständigkeit halber der gesamte PLC mit den bekanntesten Methoden (nicht nur der Fehleranalyse), welche innerhalb dieser Phasen häufig Anwendung finden, vorgestellt.

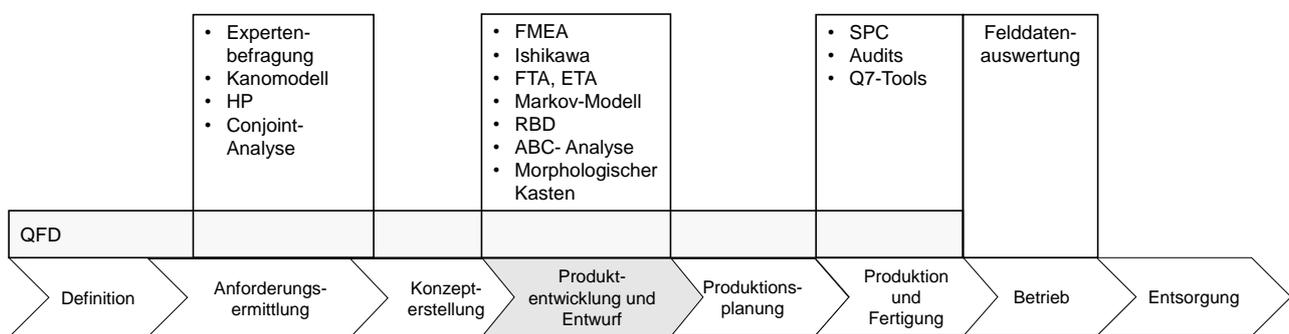


Abbildung 26: Zuordnung der Methoden zum PLC [in Anlehnung an Spath et al. 2000; Bertsche 2004; Kamiske 2013; VDI 4003:2007]

Schlussfolgernd aus der Abbildung 26 werden folgende Methoden ausschließlich in der Phase der PE angewendet:

- FMEA,
- Ishikawa,
- FTA, ETA,
- Markov-Modell,
- RBD,
- QFD,
- ABC- Analyse und
- Morphologischer Kasten.

Die ABC-Analyse, QFD und der Morphologische Kasten sind zwar bewährte Methoden in der PE, haben aber nicht den Fokus auf das Analysieren von Fehlern. Aus diesem Grund werden diese Methoden ausgeschlossen. Eine weitere Differenzierungsmöglichkeit von MdF ergibt sich im Hinblick auf die Verfügbarkeit von Daten und Informationen. Wenn Daten und Informationen nicht vorhanden sind (z. B. bei der Entwicklung von neuen Produkten), können einige Methode „qualitativ“ bspw. anhand einer Expertenbefragung durchgeführt werden. Diese Methoden werden „qualitative

Methoden“ genannt. Im Gegensatz dazu werden die Methoden, die auf Basis einer konsistenten Datenlage angewendet werden, als „quantitative Methoden“ bezeichnet. Zudem gibt es noch die sogenannten „semi-quantitativen Methoden“, welche sich dadurch kennzeichnen, dass diese für die Durchführung nur teilweise Daten benötigen (z. B. über die Auftrittswahrscheinlichkeit, basierend auf bekannten, statistischen Werten). Einige der Methoden können, je nach der Verfügbarkeit von Daten, zugleich qualitativ, semi-quantitativ oder quantitativ sein (wie bspw. FTA). Eine zusammenfassende Übersicht über die Zuordnung der MdF in Abhängigkeit der verfügbaren Daten oder Datensituation liefert Tabelle 10 [ISO 26262-9; Bertsche 2009].

Tabelle 10: Zuordnung der Methoden der Fehleranalyse in Abhängigkeit der Datensituation in Anlehnung an [ISO 26262-9; Bertsche 2009]

	qualitativ	semi-quantitativ	quantitativ
Methoden	<ul style="list-style-type: none"> • FTA, ETA und Bow-Tie • FMEA / FMECA • Ishikawa 	<ul style="list-style-type: none"> • FTA • FMEA / FMECA 	<ul style="list-style-type: none"> • FTA • Markov-Modell • RBD

In einigen Quellen der Fachliteratur werden MdF den Bereichen der Qualitätswissenschaften und der Zuverlässigkeitstechnik zugeordnet. Trotz der fachlichen Differenzierung stehen beide Bereiche in Beziehung zueinander, denn die Zuverlässigkeit ist definiert als „Qualität pro Zeit“ [vgl. Meyna 2010, S. XVIII]. Um eine vollständige Erhebung zu ermöglichen, wurden sowohl MdF aus den Qualitätswissenschaften als auch aus der Zuverlässigkeitstechnik berücksichtigt, sodass insgesamt sieben MdF berücksichtigt werden:

- FMEA,
- Ishikawa-Diagramm (Ursache-Wirkungs-Analyse),
- Fehlerbaumanalyse (FTA),
- Ereignisbaumanalyse (ETA),
- Bow-Tie Methode (FTA und ETA),
- RBD (Reliability block diagram) und
- Markov-Modell.

Eine detaillierte Auseinandersetzung und Beschreibung der Methoden (allgemeine Definition, Ziel, Anwendungsbereich, In- und Outputs, Vor- und Nachteile und eine Herleitung der neuen Anforderungen an MemogaFa) ist in Anhang B ausgeführt.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Analyse aus Anhang B in einer destillierten Form vorgestellt. Zunächst wird untersucht, ob Fehlerdefinitionen bei den sieben MdF vorhanden sind, dann werden neue Anforderungen an die MemogaFa aus den untersuchten MdF hergeleitet sowie zusammengefasst dargestellt.

2.4.1 FMEA

Die Failure Mode and Effects Analysis (Deutsch: Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse) (FMEA) verwendet keine konkrete Fehlerdefinition, stattdessen wird der Begriff „Fehlzustand“ bei der Durchführung der Methode oft erwähnt und wie folgt definiert: „Fehlzustand ist ein Zustand einer Einheit, in dem sie unfähig ist, eine geforderte Funktion zu erfüllen, wobei die durch Wartung oder andere geplante Handlungen bzw. durch das Fehlen äußerer Mittel verursachte Funktionsunfähigkeit ausgeschlossen ist“ [DIN EN 60812, S. 6]. Zwar ermöglicht die FMEA die Identifikation von potentiellen Fehlern auch als Fehlerfolgenkette (mit Fehlerfolgen, Fokuselement und Fehlerursache) auf verschiedenen Systemebenen [vgl. AIAG und VDA 2019], jedoch die Betrachtung der Wechselwirkungen und Kombinationen von Fehlerursachen ist bei der FMEA nicht vorgesehen. Stattdessen verläuft die Identifikation der Fehler („Einfachfehler“) bedingt durch das Formblatt linear und auf die Aspekte der Fehlerursache, Fehler und Fehlerauswirkung reduziert. Daher ist die Anwendung der FMEA bei der Entwicklung mechatronischer Systeme, denen ein gewisser Komplexitätsgrad zugrunde liegt, problematisch [Preiss 2009; DIN EN 60812]. Die Möglichkeit, die FMEA sowohl qualitativ als auch quantitativ einsetzen zu können, ist einer der Vorteile dieser Methode. Insgesamt ergeben sich für die neu zu entwickelnder Methodik folgende, **vorläufige Anforderungen (VA)**:

Nr.	Anforderungen abgeleitet aus der Fehlerbeschreibung
VA8	Die MemogaFa soll nicht nur Einfachfehler, sondern auch Fehlerkombinationen, Wechselwirkungen und Beziehungen sowie Abhängigkeiten identifizieren.
VA9	Die MemogaFa soll für mechatronische Systeme anwendbar sein.
VA10	Die MemogaFa soll systematisch und iterativ sein.
VA11	Die MemogaFa soll das Fehlerrisiko ermitteln.

2.4.2 Ishikawa (Ursache-Wirkungs-Diagramm)

Für das Ursache-Wirkungs-Diagramm ist keine Fehlerdefinition vorhanden. Stattdessen werden verschiedene Ursachen, die zu einer Auswirkung führen, thematisiert. Dabei kann diese Auswirkung auch als Fehler bzw. Fehlerauswirkung verstanden werden. Die Stärke dieser Methode liegt vor allem in der detaillierten und systematischen Ausarbeitung von Ursachen [VDA 2006; Kamiske 2013]. Allerdings werden die Ursachen auch bei Ishikawa nur einzeln und nicht in Kombination oder in Wechselwirkung betrachtet. Somit werden aus Sicht der Modellierung Relationen nur sequenziell, von einer groben zu einer detaillierten Ursache erarbeitet. Eine Vernetzung einzelner Ursachen ist nicht vorgesehen. Daraus ergeben sich folgende vorläufige Anforderungen an die neue Methodik:

Nr.	Anforderungen abgeleitet aus der Fehlerbeschreibung
VA12	Die MemogaFa soll Kombinationen von Ursachen betrachten können.
VA13	Die MemogaFa soll Wechselwirkungen darstellen und analysieren können.

2.4.3 Fehlerbaumanalyse (FTA), Ereignisbaumanalyse (ETA) und Bow-Tie Methode

Aus der Kombination der Fehlerbaumanalyse (FTA) und der Ereignisbaumanalyse (ETA) resultiert die Bow-Tie Methode, weshalb diese drei Methoden an dieser Stelle zusammen betrachtet werden. Den Methoden liegt die gleiche Fehlerdefinition zu Grunde: Fehler sind grundsätzlich abnormal auftretende Erscheinungen, während Fehlzustände einer höheren Ordnung entsprechen oder ein eher generelles Ereignis beschreiben [Vesely und Stamatelatos 2002].

Dies impliziert bereits, dass diese Methoden im Gegensatz zur FMEA (mit dem Fokus auf die Fehlzustände) eine detailliertere Betrachtung eines Fehlers ermöglichen, indem Fehler auf verschiedenen Systemebenen, von einer niedrigen (Basisereignis) bis hin zu einer höheren Ordnung (Top Ereignis), analysiert werden [Preiss 2009; DIN 61025]. Demnach werden Komponenten und/oder Funktionen eines Systems über mehrere Systemebenen hinweg betrachtet. Allerdings ist die Identifikation von Ursache-Wirkungs-Beziehungen nur bis zu einer bestimmten Anzahl an Elementen möglich. Die Analyse kann sowohl quantitativ als auch qualitativ erfolgen, jedoch ohne zeitliche Abhängigkeiten, wodurch ausschließlich statische Modelle erzeugt werden. Zudem werden die Fehler- und Ereignisbäume in ihrer grafischen Darstellung bei einer großen Anzahl an Ebenen und Elementen für den Anwender unübersichtlich. Die Transparenz geht dadurch verloren [Schnieder 2013; Klipper 2015]. Dementsprechend ergeben sich folgende Anforderungen an die neue Methodik:

Nr.	Anforderungen abgeleitet aus der Fehlerbeschreibung
VA14	Die MemogaFa soll die Wechselwirkungen unterschiedlicher Systemelemente auch bei einem komplexen System transparent darstellen.
VA15	Die MemogaFa soll Ursache-Wirkungs-Beziehungen identifizieren.
VA16	Die MemogaFa soll zeitliche Abhängigkeiten im Systemmodell darstellen bzw. erfassen.

2.4.4 RBD (Reliability block diagram)

Das Reliability block diagram (Deutsch: Zuverlässigkeitsblockdiagramm) (RBD) ermittelt die Funktionsfähigkeit eines Systems auf Basis der strukturellen Anordnung der Komponenten. Eine Fehlerdefinition existiert nicht. Durch die quantitative Bestimmung der Funktionsfähigkeit und Überlebenswahrscheinlichkeit kann der Bedarf an redundanten Teilsystemen auf einer sehr detaillierten Systemebene ermittelt werden [Salvatore et al. 2006; Meyna 2010].

Allerdings fehlt auch hier der zeitliche Bezug und die Methode stößt bei steigender Komplexität an ihre Grenzen. Demnach ergeben sich folgende, vorläufige Anforderungen an die neue Methodik:

Nr.	Anforderungen abgeleitet aus der Fehlerbeschreibung
VA17	Die MemogaFa soll den zeitlichen Verlauf berücksichtigen.
VA18	Die MemogaFa soll für komplexe Systeme geeignet sein.

2.4.5 Markov-Modell

In dem sogenannten Markov-Modell können gegenwärtige und zukünftige Zustände des Systems sowie Reparaturen, Redundanzen und Fehlertoleranzen abgebildet werden [DIN EN 31010; Ericson 2005; Binfet-Kull et al. 1999]. Eine Fehlerdefinition ist nicht vorgegeben. Das Markov-Modell ist nur auf Systeme mit geringer Elementanzahl verwendbar. Bei großen Systemen mit einer Vielzahl an Elementen wird diese Methode schnell unübersichtlich [Schnieder 2013]. Zudem ist eine nachträgliche Ergänzung von Informationen, wie es bei Iterationsschleifen der PE der Fall ist und die Fehlerbeschreibung fordert, problematisch. Infolge ergeben sich weitere Anforderungen an die neue Methodik:

Nr.	Anforderungen abgeleitet aus der Fehlerbeschreibung
VA19	Die MemogaFa soll für kleine und große Systeme geeignet sein.
VA20	Die MemogaFa soll für die PE-Prozesse und ihre iterativen Veränderungen geeignet sein.

2.4.6 Zusammenfassung der Anforderungen aus den Methoden der Fehleranalyse

Tabelle 11 fasst alle vorläufigen Anforderungen an die neue MemogaFa, hergeleitet aus den letzten Abschnitten, zusammen.

Tabelle 11: Vorläufige Anforderungen (VA) an die neue MemogaFa resultierend aus den Methoden der Fehleranalyse und den Forschungsfragen

Nr.	Anforderungen aus den Methoden der Fehleranalyse in der Produktentwicklung	Beschreibung/ Anmerkung (AF=Anforderung)
VA8	Die MemogaFa soll nicht nur Einfachfehler, sondern auch Fehlerkombinationen, Wechselwirkungen und Beziehungen sowie Abhängigkeiten identifizieren.	AF aus FMEA
VA9	Die MemogaFa soll für mechatronische Systeme anwendbar sein.	AF aus FMEA
VA10	Die MemogaFa soll systematisch und iterativ sein.	AF aus FMEA
VA11	Die MemogaFa soll das Fehlerrisiko ermitteln.	AF aus Ishikawa
VA12	Die MemogaFa soll Kombinationen von Fehlerursachen betrachten können.	AF aus Ishikawa
VA13	Die MemogaFa soll Wechselwirkungen darstellen und analysieren können.	AF aus Ishikawa
VA14	Die MemogaFa soll die Wechselwirkungen unterschiedlicher Systemelemente auch bei einem komplexen System transparent darstellen.	AF aus FTA/ ETA/ Bow Tie
VA15	Die MemogaFa soll Ursache-Wirkungs-Beziehungen identifizieren.	AF aus FTA/ ETA/ Bow Tie
VA16	Die MemogaFa soll zeitliche Abhängigkeiten im Systemmodell darstellen bzw. erfassen.	AF aus FTA/ ETA/ Bow Tie
VA17	Die MemogaFa soll den zeitlichen Verlauf berücksichtigen.	AF aus RBD
VA18	Die MemogaFa soll für komplexe Systeme geeignet sein.	AF aus RBD
VA19	Die MemogaFa soll für kleine und große Systeme geeignet sein.	AF aus Markov
VA20	Die MemogaFa soll für die PE-Prozesse und ihre iterativen Veränderungen geeignet sein.	AF aus Markov

Um Doppeldeutigkeiten, Ähnlichkeiten und Widersprüchlichkeiten bei den vorläufigen Anforderungen an die MemogaFa zu vermeiden, werden diese in einer Korrelationsmatrix gegenübergestellt (siehe Tabelle 12). Auf diese Weise werden mögliche „Konflikte“ zwischen den vorläufigen Anforderungen erkannt.

Tabelle 12: Korrelationsmatrix hinsichtlich der Anforderungen an die Entwicklung der MemogaFa

Legende: ● Anforderung korreliert ▶ Anforderung korreliert zum Teil ○ Anforderung korreliert nicht	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)
(8) Die MemogaFa soll nicht nur Einfachfehler, sondern auch Fehlerkombinationen, Wechselwirkungen und Beziehungen sowie Abhängigkeiten identifizieren.	■	○	○	○	▶	▶	▶	○	○	○	○	○	○
(9) Die MemogaFa soll für mechatronische Systeme anwendbar sein.	■	■	○	○	○	○	○	○	○	○	▶	○	○
(10) Die MemogaFa soll systematisch und iterativ sein.	■	■	■	○	○	○	○	○	○	○	○	○	▶
(11) Die MemogaFa soll das Fehlerrisiko ermitteln.	■	■	■	■	○	▶	○	○	○	○	○	○	○
(12) Die MemogaFa soll Kombinationen von Fehlerursachen betrachten können.	■	■	■	■	■	○	○	○	○	○	○	○	○
(13) Die MemogaFa soll Wechselwirkungen darstellen und analysieren können.	■	■	■	■	■	■	●	○	○	○	○	○	○
(14) Die MemogaFa soll die Wechselwirkungen unterschiedlicher Systemelemente auch bei einem komplexen System transparent darstellen.	■	■	■	■	■	■	■	○	○	○	▶	○	○
(15) Die MemogaFa soll Ursache-Wirkungs-Beziehungen identifizieren.	■	■	■	■	■	■	■	■	○	○	○	○	○
(16) Die MemogaFa soll zeitliche Abhängigkeiten im Systemmodell darstellen bzw. erfassen.	■	■	■	■	■	■	■	■	■	●	○	○	○
(17) Die MemogaFa soll den zeitlichen Verlauf berücksichtigen.	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	○	○	○
(18) Die MemogaFa soll für komplexe Systeme geeignet sein.	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	○	○
(19) Die MemogaFa soll für kleine und große Systeme geeignet sein.	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	○
(20) Die MemogaFa soll für die PE-Prozesse und ihre iterativen Veränderungen geeignet sein.	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Aus der Analyse mittels der Korrelationsmatrix geht hervor, dass folgende Anforderungen sehr ähnlich sind bzw. korrelieren: VA13 mit VA14 und VA16 mit VA17 (**fett markiert** in Tabelle 12). Daher werden diese Anforderungen zusammengefasst. Zudem ist die VA18 („Die MemogaFa soll für komplexe Systeme geeignet sein“) in der VA14 („Die MemogaFa soll die Wechselwirkungen unterschiedlicher Systemelemente auch bei komplexen Systemen transparent darstellen“) bereits vorhanden und muss daher nicht weiter berücksichtigt werden. Widersprüchliche Anforderungen konnten nicht entdeckt werden. Aus der Korrelationsmatrix (vgl. Tabelle 12) ergab sich die zusammengefassten Anforderungen an die eigene Methodik aus den Methoden der Fehleranalyse in der PE (vgl. Tabelle 13).

Tabelle 13: Anforderungen an die eigene Methodik aus den Methoden der Fehleranalyse in der PE

Nr.	Anforderungen abgeleitet aus den Methoden der Fehleranalyse in der PE
A8	Die MemogaFa soll nicht nur Einfachfehler, sondern auch Fehlerkombinationen, Wechselwirkungen und Beziehungen sowie Abhängigkeiten identifizieren.
A9	Die MemogaFa soll für mechatronische Systemen anwendbar sein.
A10	Die MemogaFa soll systematisch und iterativ sein.
A11	Die MemogaFa soll das Fehlerrisiko ermitteln.
A12	Die MemogaFa soll Kombinationen von Fehlerursachen betrachten können.
A13	Die MemogaFa soll die Wechselwirkungen unterschiedlicher Systemelemente auch bei einem komplexen System transparent darstellen.
A14	Die MemogaFa soll Ursache-Wirkungs-Beziehungen identifizieren.
A15	Die MemogaFa soll zeitliche Abhängigkeiten im Systemmodell darstellen bzw. erfassen.
A16	Die MemogaFa soll für kleine und große Systeme geeignet sein.
A17	Die MemogaFa soll für die PE-Prozesse und ihre iterativen Veränderungen geeignet sein.

Um den Forschungsbedarf für eine modellbasierten und ganzheitlichen Methodik zur Fehleranalyse zu unterstreichen, werden die bekanntesten MdF aus PE den erarbeiteten Anforderungen (A8 bis A17) gegenübergestellt und hinsichtlich der Anforderungserfüllung bewertet (vgl. Tabelle 14).

Tabelle 14: Bewertung der bekanntesten Methoden der Fehleranalyse aus der Qualitätswissenschaften und der Zuverlässigkeitsanalyse anhand der Anforderungen [in Anlehnung an DIN EN 31010; ISO IEC, Kamiske 2013, Schnieder 2013]

Methoden \ Anforderungen	Legende:										
	<ul style="list-style-type: none"> ● Anforderung vollständig erfüllt ◐ Anforderung zum Teil erfüllt ○ Anforderung nicht erfüllt 										
	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	
FMEA/ FMECA	○	◐	◐	●	○	◐	●	○	◐	◐	
Ishikawa	○	○	◐	○	○	○	●	○	○	○	
FTA, ETA und Bow-Tie	●	●	◐	○	●	◐	●	◐	◐	○	
RBD	○	●	◐	○	○	◐	◐	◐	◐	○	
Markov-Modell	○	●	○	○	○	◐	●	○	◐	○	

Aus Tabelle 14 wird erkennbar, dass **keine der untersuchten Methoden** die hergeleiteten **Anforderungen vollständig erfüllt**. Daraus leitet sich der **Forschungs- und Entwicklungsbedarf für die neue zu entwickelnde MemogaFa ab, die diese Anforderungen erfüllen soll**.

Ergänzend dazu ergibt sich mit den anderen Anforderungen (aus den Forschungsfeldern 1-3) eine Liste mit insgesamt siebzehn Anforderungen an die MemogaFa. Diese Anforderungen werden im folgenden Zwischenfazit vorgestellt.

2.5 Zwischenfazit und die Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik

Abgeleitet aus dem Stand der Technik (Kapitel 2) und der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit, werden in Tabelle 15 alle Anforderungen an MemogaFa zusammengefasst präsentiert.

Tabelle 15: Zusammenfassung aller Anforderungen an die neue zu entwickelnde MemogaFa

Nr.	Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik für eine modellbasierte und ganzheitliche Fehleranalyse
Anforderungen abgeleitet aus der Fehlerdefinition (Kapitel 2.1):	
A1	Die Fehlerbeschreibung soll die Wirkungskette (Ursache, Effekt, Wirkung und Auswirkung oder Folge) beinhalten.
A2	Der Bezug eines Fehlers (z. B. Anforderung, Funktion, Element oder Teils-System) muss in der Beschreibung vorhanden sein.
A3	Für eine einheitliche Fehlerbeschreibung soll der Satzbau zur Beschreibung von Fehlern definierte syntaktische Regel einhalten.
Anforderungen abgeleitet aus Modellen, Modellierungssprachen und Regeln (Kapitel 2.2):	
A4	Die Modellierung soll nach bestimmten Gestaltungsleitsätze, Regel und Notation erfolgen.
A5	Das Systemmodell soll einheitliche Elemente, Relationen und Attribute beinhalten.
Anforderungen abgeleitet aus der Fehlerbeschreibung (Kapitel 2.3):	
A6	Betrachtung der Felder „Komponenten“, „Funktionen“, „Ereignisse“ und „Effekte“ sowie „Umweltfaktoren“ bei der Fehlerbeschreibung auf grober Ebene.
A7	Verarbeitung von Informationen bezüglich „Allgemeine Informationen“, „Fehlerarten“, „Fehlerursachen und Fehlerauswirkungen“ sowie „Fehlerrisiko“.
Anforderungen abgeleitet aus den Methoden der Fehleranalyse in der Produktentwicklung (Kapitel 2.4):	
A8	Die MemogaFa soll nicht nur Einfachfehler, sondern auch Fehlerkombinationen, Wechselwirkung und Beziehungen sowie Abhängigkeiten identifizieren.
A9	Die MemogaFa soll für mechatronische Systemen anwendbar sein.
A10	Die MemogaFa soll systematisch und iterativ sein.
A11	Die MemogaFa soll das Fehlerrisiko ermitteln.
A12	Die MemogaFa soll Kombinationen von Fehlerursachen betrachten können.
A13	Die MemogaFa soll die Wechselwirkungen unterschiedlicher Systemelementen auch bei komplexen, technischen Systemen transparent darstellen.
A14	Die MemogaFa soll Ursache-Wirkungs-Beziehungen identifizieren.
A15	Die MemogaFa soll zeitliche Abhängigkeiten im Systemmodell darstellen bzw. erfassen.
A16	Die MemogaFa soll für kleine und große Systeme geeignet sein.
A17	Die MemogaFa soll für die PE-Prozesse und ihre iterativen Veränderungen geeignet sein.

Im Zentrum des nachfolgenden Kapitels steht die Entwicklung der MemogaFa, die erwiesenermaßen aus dem Forschungsbedarf resultiert und die Anforderungen aus Tabelle 15 zu erfüllen hat.

3 Entwicklung der Methodik für eine modellbasierte und ganzheitliche Fehleranalyse

Die Entwicklung der Methodik ist der Kern der vorliegenden Arbeit und wird in den folgenden zwei Kapiteln vorgestellt. Im ersten Kapitel 3.1 werden **zwei Phasen zur Entwicklung der Methodik hergeleitet** und beschrieben. Dabei fließen die Resultate aus den bearbeiteten Forschungsfeldern (vgl. Kapitel 2) in die Phasen der Entwicklung der MemogaFa ein. Diese Phasen werden mithilfe mehrerer Schritte mit Methoden und Tools realisiert. Die gesamte Methodik wird dann im Kapitel 3.2 als Zwischenfazit vorgestellt.

3.1 Herleitung und Beschreibung der Schritte der Methodik für eine modellbasierte und ganzheitliche Fehleranalyse

Wie im Kapitel 2.3 festgestellt, benötigt jede Methode der Fehleranalyse relevante und strukturierte Informationen (z. B. über Systemelemente, Umweltfaktoren, Effekte usw.), um ganzheitlich Fehler zu erfassen. Des Weiteren ergibt sich aus dem Kapitel 2.2 (sowie Anhang D) der Bedarf, Informationen im Zusammenhang mit einem standardisierten Systemmodell bereitzustellen, damit Zusammenhänge zwischen Fehlerursachen und -auswirkung besser identifiziert werden können. Deshalb sollen die Informationen für die ganzheitliche Fehleranalyse modellbasiert bereitgestellt werden. Dafür sollen die Prinzipien des systemischen Denkens aus dem SE sowie eine geeignete Modellierung (vgl. Kapitel 2.2) angewendet und umgesetzt werden. Somit wird die **erste Phase** zur Entwicklung der Methodik wie folgt benannt: **„Modellbasierte Bereitstellung der Informationen für die Fehleranalyse und Fehlerbeschreibung“ (Phase A)**.

Doch wie soll eine „ganzheitliche Fehleranalyse“ erfolgen? Reicht die Modellierung des Produktsystems aus, um eine ganzheitliche Fehleranalyse zu gewährleisten? Wie in der Problemstellung erwähnt, bedeutet „ganzheitlich“ für diese Arbeit die Berücksichtigung aller relevanten Faktoren, welche in der Nutzungsphase eines Produkts oder Produktsystems potentielle Fehler verursachen können. Dies bedeutet, dass bei der ersten Phase nicht nur Informationen über das technische Produktsystem, sondern auch über die relevanten Umweltfaktoren, Ereignisse und Effekte, die das Produktsystem in der Nutzungsphase negativ beeinflussen können, für die ganzheitliche Fehleranalyse verfügbar sein sollen.

Um technische Produktsysteme modellbasiert abzubilden, erfolgte im Kapitel 2.2 die thematische Auseinandersetzung mit Modellen, Modellierungssprachen und Modellierungsregeln, sowie die Auswahl eines geeigneten Modellierungsansatzes für die Erstellung eines konsistenten Systemmodells. Für die ganzheitliche Fehlerbeschreibung wurden im Kapitel 2.3 vier Felder benannt: Produktsystem, Ereignisse, Umweltfaktoren und Effekte.

Diese Felder sollen für die erste Phase genutzt werden, um eine ganzheitliche Fehleranalyse zu ermöglichen. Demzufolge bilden die Kapitel 2.2 und 2.3 den Input für die erste Phase der Entwicklung der MemogaFa, sodass in dieser Phase alle notwendigen Informationen modellbasiert vorhanden sind, um in der zweiten Phase die ganzheitliche Fehleranalyse durchzuführen.

Die Vorgehensweise zur Realisierung der **zweiten Phase** erfolgt nach dem Top-Down-Prinzip. D. h. die modellbasierten Informationen werden sukzessive gefiltert, dadurch ergibt sich **aus einer „groben“ Fehleranalyse und -beschreibung eine „detaillierte“ Fehleranalyse und -beschreibung**. Deshalb heißt die zweite Phase zur Entwicklung der Methodik: **„Fehleranalyse (vom Groben zum Detail)“ (Phase B)**. Dafür wird das Fehlerverständnis aus den Forschungsfeldern 1 und 3 (Kapitel 2.1 und 2.3) aufgegriffen. Die ganzheitliche Fehlerdefinition (vgl. Abbildung 25) und die systematische Klassifizierung von Fehlerarten und -klassifikation (vgl. Tabelle 2) sollen in dieser Phase synthetisiert werden. Des Weiteren sollen die untersuchten MdF aus dem Kapitel 2.4 bei Bedarf verwendet werden, um potentielle Fehler vollständig zu erfassen. In Abbildung 27 wird der Übersicht halber skizziert, wie die Ergebnisse aus den Forschungsfeldern in die zwei oben beschriebenen Phasen einfließen.

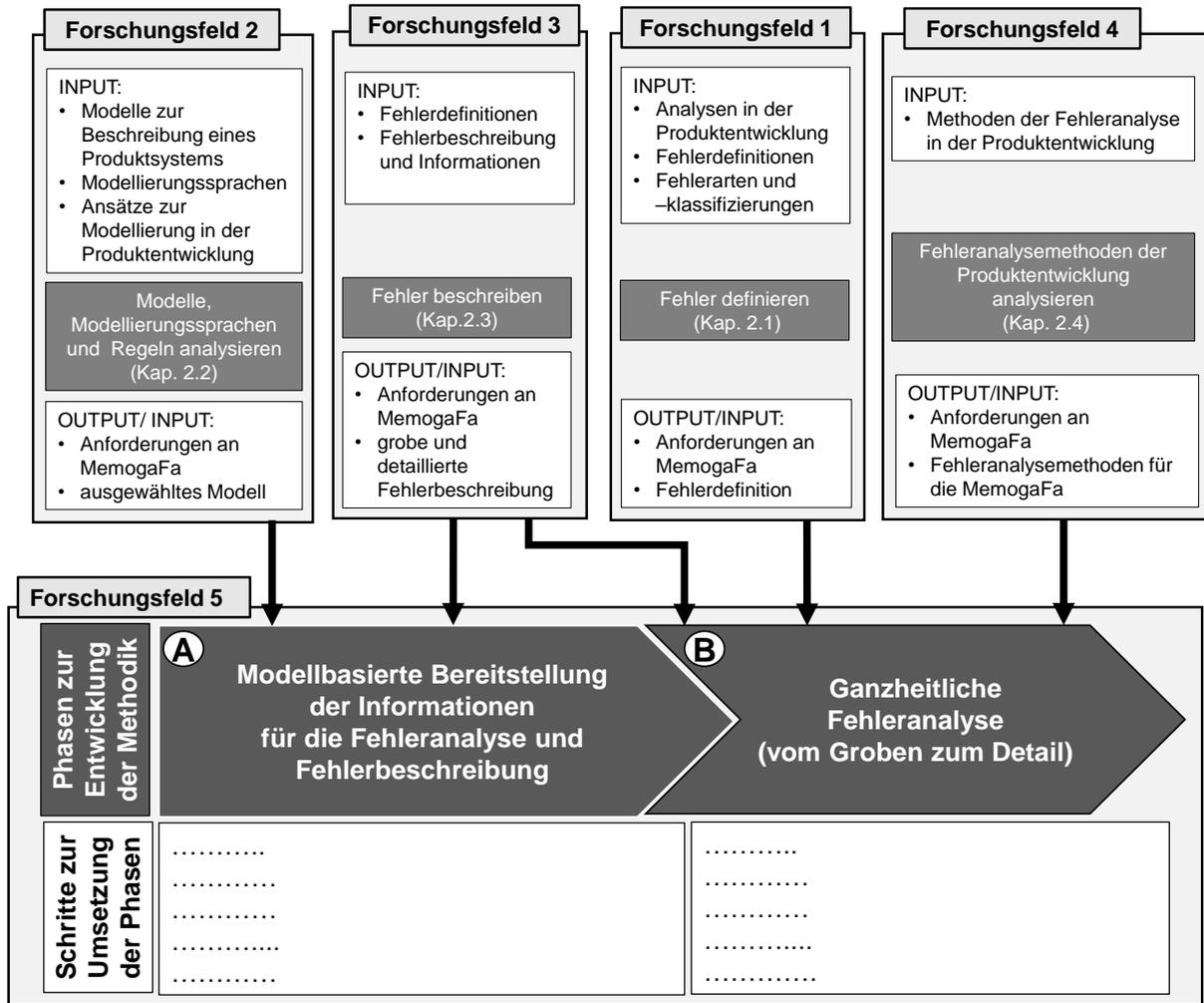


Abbildung 27: Herleitung der Phasen zur Entwicklung der MemogaFa [eigene Darstellung]

Für die Realisierung der zwei „groben“ Phasen sind einzelne Schritte notwendig, die in den folgenden zwei Abschnitten hergeleitet werden. Zudem sind für die Umsetzung der einzelnen Schritte Methoden und Tools (Werkzeuge) erforderlich. Die Herleitung der einzelnen Schritte mit den entsprechenden Methoden und Tools wird nachfolgend näher erläutert.

3.1.1 Phase A: Modellbasierte Bereitstellung der Informationen für die Fehleranalyse und Fehlerbeschreibung

Die erste Phase zur Entwicklung der Methodik bildet die Basis für die Durchführung einer modellbasierten und ganzheitlichen Fehleranalyse. Dafür ist es erforderlich, alle relevanten und wichtigen Informationen in Form eines Systemmodells strukturiert bereitzustellen. Da der Vorgang zur Bereitstellung der Informationen und die Erstellung eines Systemmodells als Informationspool erwiesenermaßen nicht in einem Schritt realisiert werden kann (vgl. Kapitel 2.2), muss diese Phase aus mehreren Schritten bestehen. Sinnvollerweise soll vor dem Beginn der Methodikanwendung das Ziel

definiert werden. Insbesondere, wenn die Methodik in einem interdisziplinären Team von Entwicklern angewendet werden soll, ist eine gemeinsame Zielverfolgung eine Voraussetzung für die erfolgreiche Zusammenarbeit. Mit Blick auf die Praxis sind daher zwei Fragen relevant:

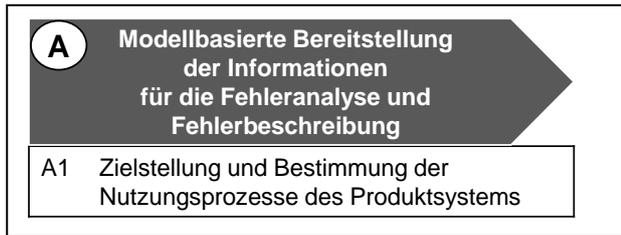
- Wofür soll die Methodik angewendet werden?
- Was soll mit der Methodik erreicht werden?

Der Anwendungsbereich der Methodik wurde bereits im ersten Kapitel definiert: „Dabei soll der Fokus der Fehleranalyse für die Produktentwickler auf der **potentiellen Nutzung bzw. Nutzungsphase**⁹ eines technischen Produkts liegen (vgl. Kapitel 1.2)“. Folglich müssen in diesem Schritt die potentiellen Nutzungsprozesse aus der Nutzungsphase identifiziert werden. Deshalb wird der **erste Schritt „Zielstellung und Bestimmung der potentiellen Nutzungsprozesse des Produktsystems“** genannt. Im zweiten Schritt, soll idealerweise basierend auf Erfahrungswerten und Expertenwissen, der potentielle Nutzungsprozess bestimmt werden, in dem die meisten kritischen Fehler auftreten können (kritischer Nutzungsprozess). Infolge wird **der zweite Schritt „Bestimmung des kritischen, potentiellen Nutzungsprozesses für die weiterführende Analyse“** benannt.

Aufgrund der Fokussierung der Methodik auf einen einzigen Nutzungsprozess ergibt sich eine zielgerichtete Modellierung, die im Fokus des nächsten Schrittes steht. Im **dritten Schritt** der ersten Phase zur Entwicklung der Methodik erfolgt eine **„einfache“ Modellierung des Produktsystems mit Fokus auf den kritischen, potentiellen Nutzungsprozess aus Schritt 2**⁹. In diesem Zusammenhang bedeutet eine „einfache“ Modellierung, dass zuerst „nur“ das zu analysierende Produktsystem modelliert wird. Dafür wird der im Kapitel 2.2.2 ausgewählte DeCoDe-Ansatz verwendet. Nach den Prinzipien von DeCoDe und den Regeln der Modellierung sollen zuerst die Komponenten und Funktionen hergeleitet werden, die den kritischen Nutzungsprozess realisieren (vgl. Kapitel 2.2).

Damit die **„Ganzheitlichkeit“** der Fehleranalyse realisiert werden kann, ist eine **erweiterte Form der Modellierung erforderlich**. Hierbei sollten weitere, wichtige Aspekte betrachtet werden, die für die Entstehung potentiellen Fehler ausschlaggebend sein können. Gemeint sind die Ereignisse, Effekte und Umweltfaktoren. Darum wird der **vierte Schritt** der Phase A für die Entwicklung der Methodik als **„Erweiterte Modellierung des Produktsystems mit Fokus auf den kritischen, potentiellen Nutzungsprozess aus Schritt 2“** bezeichnet. Im Weiteren werden die vier benannten Schritte detaillierter beschrieben.

⁹ Ein Nutzungsprozess wird bezeichnet als ein „Prozess in der Anwendung bzw. Betrieb eines Produktsystems“ [vgl. Winzer 2016, S. 169]. In der meisten Fachliteratur wird dafür oft den Begriff Use-case (zu Deutsch Anwendungsfall) verwendet [vgl. Jacobson 1987; Weilkiens 2015].



Die Konkretisierung der Zielstellung der Methodik und die Bestimmung der potentiellen Nutzungsprozesse des zu untersuchenden Produktsystems (PS) markieren den **ersten Schritt** der Methodik. Dafür sollen Kriterien erarbeitet werden,

mit denen ein Entwicklungsteam definieren kann, „was“ mit der Methodik erreicht werden soll, und „wofür“ diese verwendet werden kann. Zu diesem Zweck werden zwei Fragen formuliert, die gleichzeitig als Kriterien zur Bildung der Zielstellung der Methodik fungieren:

- (1) Welche grundfunktionale Hauptanforderung muss durch das zu entwickelnde Produkt (oder PS) erfüllt werden?
- (2) Welche potentiellen Fehler (ausgehend von PS) können zu Personenschaden führen?

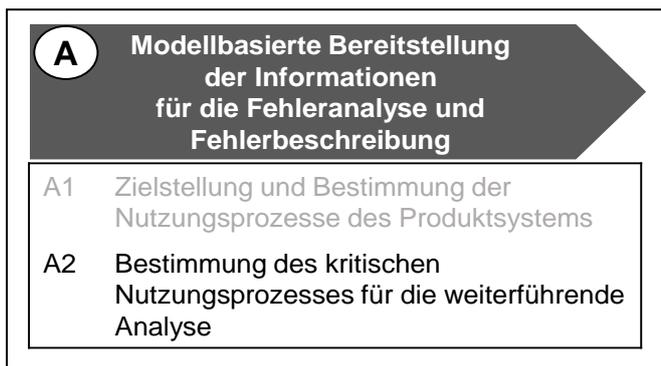
Die erste Frage ist durch das Entwicklungsteam zu beantworten. Jedes Produkt hat eine festgelegte, grundfunktionale Hauptanforderung zu erfüllen, welche sich an das Produkt als Gesamtsystem richtet (bspw. eine Waschmaschine muss Wäsche waschen, eine Kaffeemaschine muss Kaffee liefern usw.). Eine systematische Schrittfolge zur Herleitung der grundfunktionalen Hauptanforderung ist bei Sitte und Winzer zu finden [vgl. Winzer und Sitte 2011]. Die zweite Frage zielt darauf ab, bereits in der Produktkonzeption potentielle Fehler in der Nutzungsphase des PS zu identifizieren, die zu Personenschaden führen können. Hierfür muss zunächst der potentiell, kritische Nutzungsprozess bestimmt werden. Um den kritischen Nutzungsprozess zu bestimmen ist es erforderlich, alle möglichen potentiellen Nutzungsprozesse aus der Nutzungsphase des PS zu ermitteln. Diese werden dann anhand von In- und Outputs tabellarisch grob beschrieben. Aus den Nutzungsprozessen wird im nächsten Schritt der potentielle, kritische Nutzungsprozess identifiziert und präzisiert.

Methoden und Tool zur Umsetzung des ersten Schrittes der Methodik:

- Grobe Prozessanalyse der Nutzungsprozesse in tabellarischer Form.

Ergebnisse:

- Zielstellung der Methodik und
- grobe Beschreibung der Nutzungsprozesse (Tabellarisch mit In- und Outputs und grober Beschreibung).



Im **zweiten Schritt** wird der kritische, potentielle Nutzungsprozess anhand der abgeleiteten Kriterien aus dem ersten Schritt bestimmt. Im Hinblick auf die Praxis ist an dieser Stelle wichtig, Experten zu befragen, um realistische Einschätzungen darüber zu bekommen, welcher Nutzungsprozess besonders kritisch sein kann. Die Auswahl eines kritischen Nutzungs-

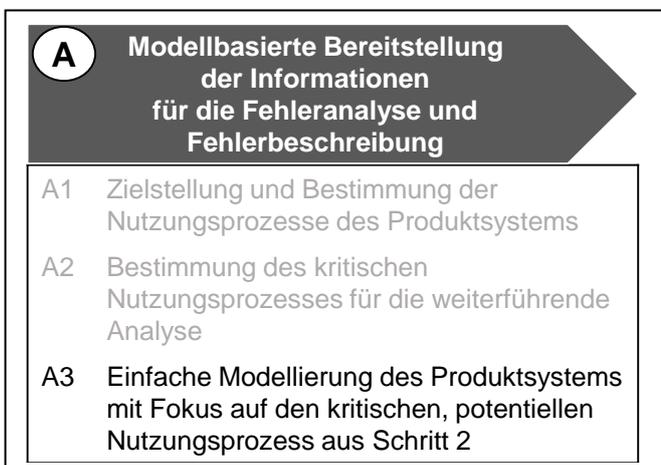
prozesses ist von großer Bedeutung, da der ausgewählte Nutzungsprozess im Zentrum der Fehleranalyse steht und somit den Korridor für die Modellierung vorgibt.

Methoden und Tool zur Umsetzung des zweiten Schrittes der Methodik:

- Erfahrungen des Entwicklungsteams,
- Befragungen und Expertenwissen und
- grobe Prozessanalyse der potentiellen Nutzungsprozesse.

Ergebnisse:

- Kritischer, potentieller Nutzungsprozess für die weiterführende Analyse (Fokus auf den kritischen Nutzungsprozess/ **1. Informationsfilter**).



Im **dritten Schritt** der Phase A erfolgt eine Modellierung mit Fokus auf den kritischen, potentiellen Nutzungsprozess. Dabei wird zunächst „nur“ das Produktsystem als ein Systemmodell abgebildet. Daher wird die Modellierung in diesem Schritt als „einfache“ Modellierung bezeichnet. In dieser Arbeit wird die Modellierung als eine Vorgehensweise betrachtet, bei der Daten, Informationen und Wissen (z. B. Expertenwissen) genutzt werden,

um unter Berücksichtigung von bestimmten Modellierungsregeln ein Modell oder Systemmodell zu erstellen. Folglich ist die Qualität des Systemmodells abhängig von der Qualität der Daten, Informationen und des Wissens, welche für die Modellierung notwendig sind. Die Qualität wird zudem auch durch drei weitere Faktoren bestimmt, die in der Fachliteratur häufig erwähnt werden: die Methoden, die Sprache und das Werkzeug der Modellierung [vgl. Echterhoff 2016, S. 36; Tschirner 2016, S. 29].

Das harmonische Zusammenspiel dieser drei Faktoren ist entscheidend, um ein valides und brauchbares Systemmodell zu generieren. Abbildung 28 stellt die Methode, Sprache und Werkzeug als die drei wichtigsten Bausteine für die Erstellung eines Systemmodells dar.

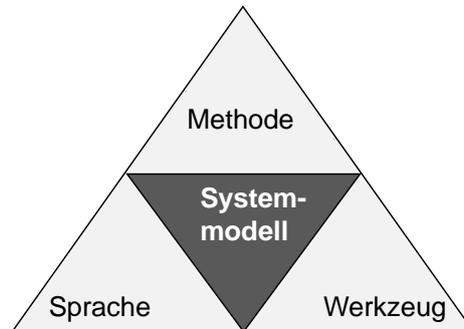


Abbildung 28: Die drei Faktoren zur Beschreibung eines Systemmodells
[in Anlehnung an Echterhoff 2016, S. 36]

In der Literatur sind diverse Methoden, Sprachen und Werkzeuge bezüglich der Systemmodellierung zu finden. Für die Erstellung eines Systemmodells als Basis der ganzheitlichen Fehleranalyse wurde in Kapitel 2.2.2 dargelegt, dass das Demand Compliant Design (DeCoDe) das größte Potential aufweist. Die drei benannten Faktoren zur Beschreibung eines Systemmodells werden in DeCoDe wie folgt umgesetzt:

- **Methode:** Zielgerichtete Vorgehensweise mittels der DeCoDe-Hauptmatrix (vgl. Abbildung 17)
- **Sprache:** Standardisierte Beschreibung der Elemente und Relationen in einem Systemmodell (vgl. Abbildung 19)
- **Werkzeug:** Komplexitätssoftware LOOME0

Methode des DeCoDe-Ansatzes

Für die methodische Umsetzung des DeCoDe-Ansatzes spielt die DeCoDe-Hauptmatrix eine wesentliche Rolle (vgl. Abbildung 17). Diese stellt die DeCoDe-Sichten gegenüber dar, die zielgerichtet vernetzt werden können. Dabei erfolgt die Vernetzung nach den Regeln der Modellierung (vgl. Kapitel 2.2.4). Abhängig vom Zeitpunkt der Modellierung und der Verfügbarkeit der Informationen über das PS, das modelliert werden soll, existieren zwei Vorgehensweisen zur Erstellung eines Systemmodells.

Die erste Vorgehensweise ist für ein PS geeignet, das physikalisch nicht vorhanden ist. In diesem Fall erfolgt die Modellierung nach dem klassischen Vorgehen aus der PE oder nach Suh (vgl. Abbildung 16) sowie den bekannten Modellen aus der Konstruktionslehre [vgl. VDI 2221; VDI 2206 und Feldhusen et al. 2013]. Hierbei beginnt die Modellierung mit der Erfassung und Strukturierung der Anforderungen, aus denen die Funktionen abgeleitet werden. Des Weiteren werden die Funktionen über physikalische Komponenten umgesetzt. Feldhusen [Feldhusen et al. 2013] bezeichnet diesen

Vorgang als Transformation der funktionalen in die physische Produktbeschreibung (vgl. Abbildung 29).

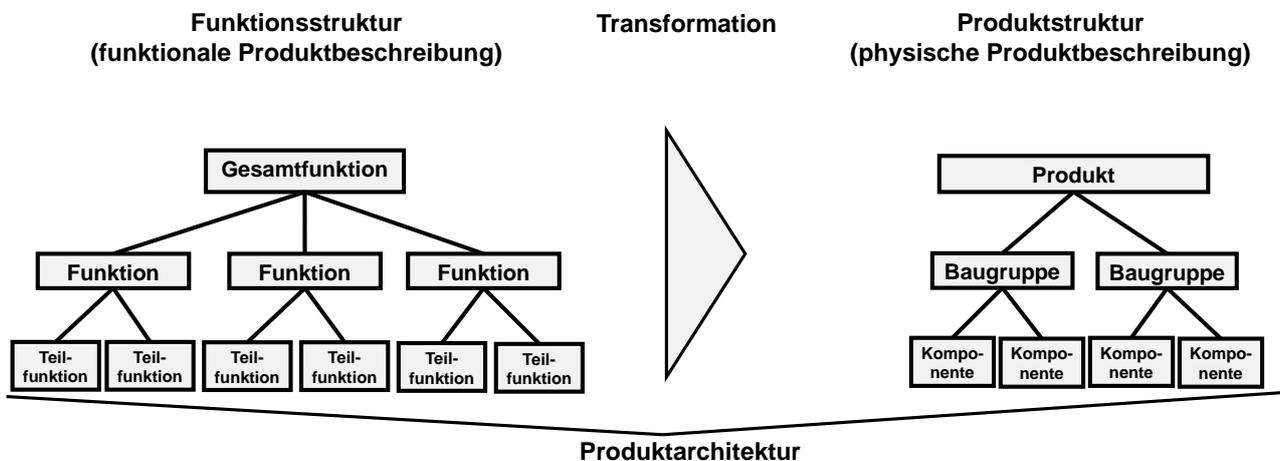


Abbildung 29: Transformation einer Funktionsstruktur in eine Produktstruktur [in Anlehnung an Feldhusen et al. 2013, S. 256]

Die zweite Vorgehensweise in der Modellierung wird angewendet, wenn das Produkt physikalisch bereits vorhanden ist. In diesem Fall ist frei wählbar, mit welcher Sicht die Modellierung angefangen wird, da die physikalische Domäne bereits vorliegt. Oft wird in diesem Fall die Komponentenstruktur erstellt, um daraus die Funktionen abzuleiten. Diese Vorgehensweise entspricht dem Vorgehen aus VDA Band 4 [vgl. VDA 2006, S. 31]. Unabhängig von der Vorgehensweise in der Modellierung sind qualitative und verfügbare Daten und Informationen enorm wichtig, um ein nutzbares Systemmodell zu erstellen. Dazu gibt es unterschiedliche Quellen mit brauchbaren, zuverlässigen und validen Daten, aus denen Eingangsinformationen für die Modellierung des Systemmodells extrahiert werden können. Hierzu einige Beispiele:

- Daten und Informationen aus bereits durchgeführten MdF,
- Expertenwissen aus Befragungen,
- vorhandene Simulationsmodelle,
- Diagramme und CAD-Zeichnungen und
- Daten und Informationen aus den Phasen der PE (vgl. Tabelle 16).

Tabelle 16: Informationen aus der PE als Input für das Systemmodell [Eigene Darstellung]

Ausgewählte Phasen der Produktentwicklung	DeCoDe-Systemmodell							
	Sichten				Relationen			
	Anforderungen	Funktionen	Prozesse	Komponenten	Energietransfer (elektrisch)	Informationsfluss (Daten, Signale)	Kraftübertragung
Anforderungsermittlung (Lastenheft)	↗							
Konzeptentwicklung (Pflichtenheft)				↗	↗	↗	↗	
Produkttest (Validierung des Prototyps)	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
Produktionsplanung (Prozessplanung z.B. vom Herstellungsprozess)	↘	↘	↔					

Legende:	
↗ Informationsfluss nur in eine Richtung (unidirektional)	↔ Informationsfluss in beide Richtungen (bidirektional)

In Tabelle 16 werden die Phasen der PE den Sichten und Relationen des DeCoDe-Systemmodells zwecks Informationsaustausches gegenübergestellt.

Sprache des DeCoDe-Ansatzes

Der DeCoDe-Ansatz beinhaltet eine standardisierte Beschreibung der DeCoDe-Systemelemente. Diese sind definiert in Tabelle 5. Zudem sind die Relationen innerhalb und zwischen den Sichten genau beschrieben (vgl. Abbildung 19).

Werkzeug für die Umsetzung des DeCoDe-Ansatzes

Für die praktische Umsetzung der Modellierung mit DeCoDe wird ein Werkzeug benötigt. Bei dem Werkzeug handelt es sich um die Software LOOME0, eine Software „zur Erfassung, Darstellung und Analyse von komplexen Systemen“ [Teseon 2018]. Mithilfe der Software können die DeCoDe-Matrizen auch als Graphen abgebildet werden. Zusätzlich bietet die Software viele Optionen, die bei der Erstellung von Matrizen mit einer großen Anzahl von Elementen und Relationen hilfreich sind (z. B. farbliche Kennung für uni- und bidirektionale Relationen).

Abbildung 30 veranschaulicht das Bearbeitungsfenster einer DSM-Matrix in LOOME mit einer ambivalenten Darstellung (Graphen und Matrizen) für eine Komponenten-Komponenten Matrix.

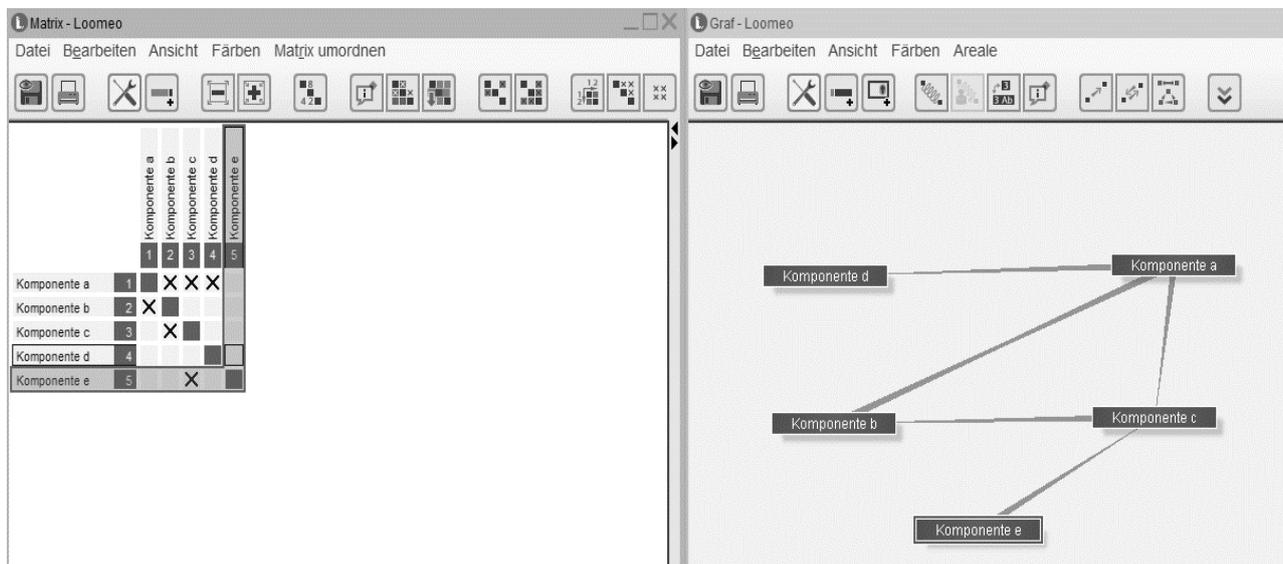


Abbildung 30: Erstellung einer Domain Structure Matrix (DSM) als Matrix (links) und Graph (rechts) in der Software LOOME [Darstellung aus der Software LOOME]

Da die grafische Darstellung nach den Prinzipien der Graphentheorie aufgebaut ist, bedeuten die Systemelemente und Relationen in der Sprache der Software „Kanten“ und „Knoten“. Diese neutrale Sprache kann vorteilhaft sein, da der Freiheitsgrad der Modellierung sehr groß ist, aber auch nachteilig, weil die Gefahr besteht, die Regeln und Methoden der Modellierung zu vernachlässigen und damit kein aussagekräftiges Systemmodell zu erstellen.

Aus diesem Grund sind die Regeln der Modellierung, die Methode der Modellierung (DeCoDe-Hauptmatrix) sowie die vorgestellten Notationen und Ontologie von großer Bedeutung. Im Sinne des DeCoDe-Ansatzes können in der Software DSM, DMM und MDM erstellt werden. Vor allem die MDM ermöglicht eine übersichtliche und transparente Darstellung auf das Gesamtsystem.

Überdies lassen sich in der MDM alle modellierten Sichten mit deren Vernetzungen visualisieren und problemspezifisch analysieren. Somit stellt die MDM eine gute Informationsbasis für die Durchführung der modellbasierten Fehleranalyse dar. Abbildung 31 zeigt eine vereinfachte Darstellung einer MDM, modelliert nach den DeCoDe-Prinzipien.

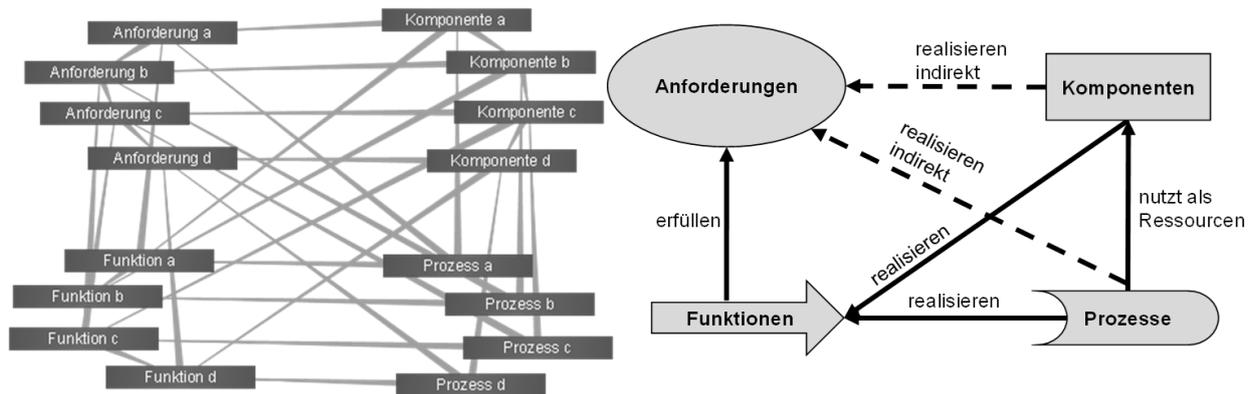


Abbildung 31: Abbildung einer Multi-Domain Matrix (MDM) nach den DeCoDe-Prinzipien in der Software LOOMEO (links Darstellung aus der Software LOOMEO, rechts in Anlehnungen an [Schlund 2011])

Durch diese multidimensionale Darstellung des Gesamtsystems kann jede einzelne Abhängigkeit sowohl innerhalb einer Domäne als auch domänenübergreifend betrachtet werden. Nachteilig bei dieser Darstellung ist die Unübersichtlichkeit mit zunehmender Anzahl von Systemelementen und Relationen. Um diesen Nachteil zu beheben, bietet die Software die sogenannte „Umgebungsfunktion“ (auch Fokusfunktion genannt) an. Mithilfe dieser Option kann der Fokus auf ein bestimmtes Systemelement gelegt werden, sodass nur die Systemelemente und Vernetzungen gezeigt werden, welche mit dem ausgewählten Systemelement in einer direkten Beziehung stehen (uni- oder bidirektional). Zugleich werden alle anderen Systemelemente, die keine direkte Beziehung zu dem ausgewählten Systemelement haben, ausgeblendet (vgl. Abbildung 32). Mit der Fokusfunktion auf den kritischen Nutzungsprozess können die Systemelemente (bspw. Funktionen und Komponente) identifiziert werden, die für die ganzheitliche Fehleranalyse relevant sein können. Damit lässt sich das Systemmodell für die Fehleranalyse hinsichtlich des kritischen Nutzungsprozesses gezielt erstellen, gemäß der Modellierungsregel: „Die Anzahl der Systemelemente und Relationen ist abhängig von der Problem- und Zielstellung der Modellierung zu bestimmen, dabei gilt es, je größer diese Anzahl, desto höher die Komplexität des Systemmodells“ (vgl. Kapitel 2.2.4).

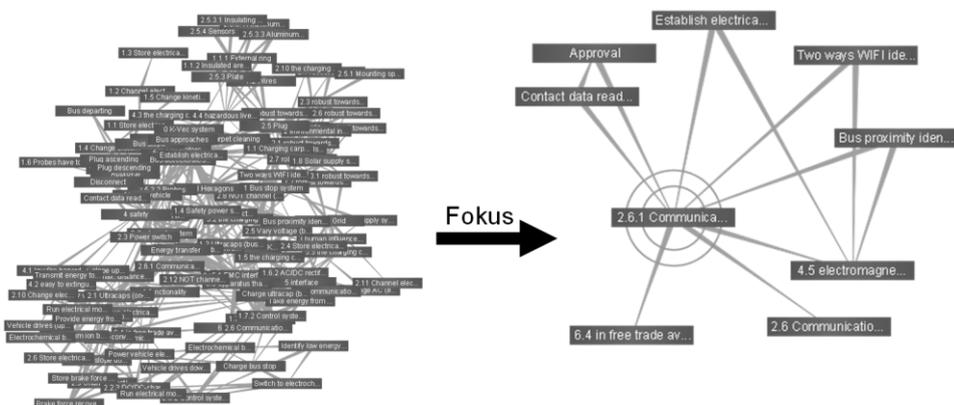


Abbildung 32: Beispiel eines modellierten PSM (links) und die Nutzung der Umgebungsfunktion/Fokusfunktion (rechts) [Prinzipdarstellung aus der Software LOOMEO]

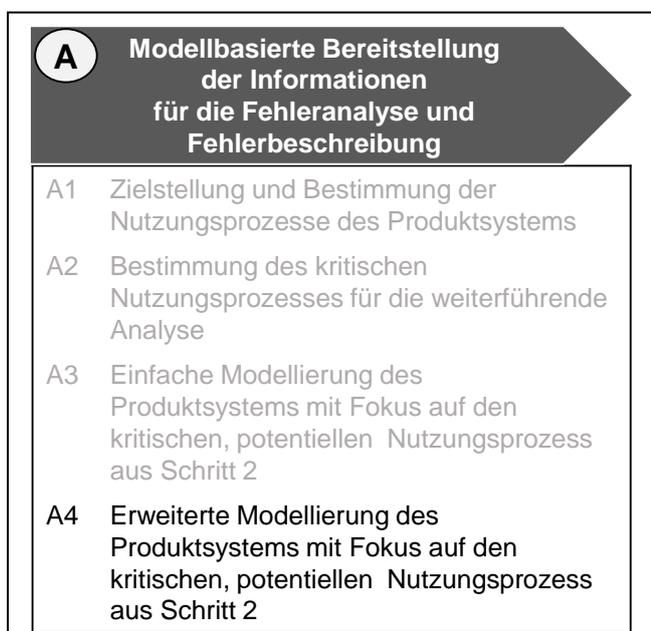
Mit dem kritischen Nutzungsprozess im Mittelpunkt, erfolgt im nächsten Schritt eine erweiterte Form der Modellierung. Hierzu sollen die für die Fehleranalyse in der Nutzungsphase relevanten Faktoren außerhalb der Systemgrenze des PS bestimmt werden.

Methodik und Tool zur Umsetzung des dritten Schrittes der Methodik:

- DeCoDe-Hauptmatrix,
- Regeln der Modellierung und
- Software LOOME0 (als Tool zur Umsetzung der Modellierung).

Ergebnisse:

- Systemmodell (Abhängig von dem Ziel aus Schritt 1):
 - Anforderungsmatrix für die Hauptanforderung,
 - Anforderungs-Funktionsmatrix,
 - Funktions-Funktions-Matrix,
 - Prozess-Komponente-Matrix,
 - Prozess-Funktions-Matrix,
 - Prozess-Komponente-Funktions-Matrix und
(Dabei sind die Komponenten und Funktionen real, während die Prozesse bzw. Nutzungsprozesse potentiell sind).



Um die „Ganzheitlichkeit“ der Fehleranalyse zu realisieren, bedarf es einer erweiterten Modellierung, bei der auch Faktoren außerhalb des PS betrachtet werden. Dazu zählen die Umweltfaktoren, Effekte und Ereignisse, welche im identifizierten, kritischen Nutzungsprozess auftreten und Fehler verursachen können. Diese erweiterte Modellierung steht im Mittelpunkt beim **vierten Schritt** zur Entwicklung der MemogaFa. Im Kapitel 2.3 wurden die Faktoren im Kontext zur Fehlerbeschreibung und Informationen auf einer groben Ebene kurz erläutert. Beschrieben wurden diese als vier Felder, die ein

Spannungsfeld der Wechselwirkungen erzeugen, um eine ganzheitliche Betrachtung hinsichtlich der Entstehung potentieller Fehler zu realisieren. Dabei sollen aus den Feldern die notwendigen Informationen für eine fundierte Fehlerbeschreibung gewonnen werden. Zwecks einer transparenten

Darstellung der Wechselwirkungen, Fehlerkombinationen und Kausalitäten, werden die vier Felder gegenübergestellt. Da es sich um **vier Felder** handelt, welche **in einer Wechselwirkung stehen**, werden diese Felder nachfolgend als **Quadranten der Wechselwirkungen** bezeichnet. Abbildung 33 skizziert die Positionierung der Felder und den Bezug zum kritischen Nutzungsprozess. Zudem ist der Unterschied zwischen der „einfachen“ und der „erweiterten“ Modellierung in der Abbildung visualisiert.

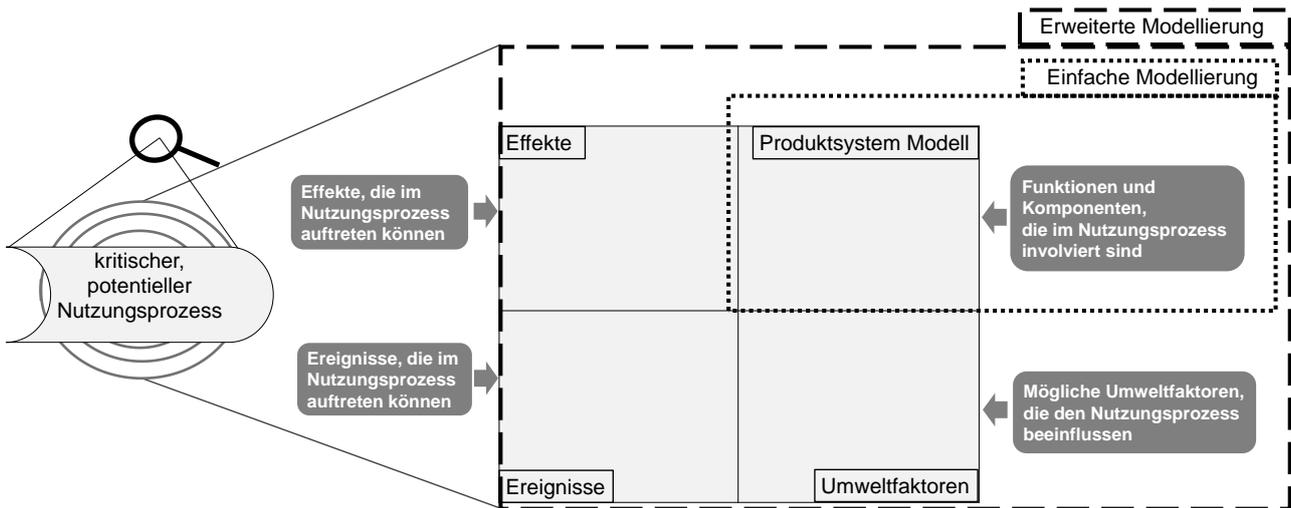


Abbildung 33: Quadranten der Wechselwirkungen mit Eingangsinformationen für die einfache und erweiterte Modellierung [Eigene Darstellung]

Anhand der erweiterten Modellierung werden die Quadranten für die ganzheitliche Fehleranalyse generiert. Der Bedarf und die Herleitung für die Quadranten werden nachfolgend erläutert.

Effekte	Produktsystem Modell
Ereignisse	Umweltfaktoren

Im oberen, rechten Quadranten befindet sich das PSM, das im dritten Schritt der MemogaFa aus der einfachen Modellierung entstanden ist. Das PSM besteht aus den Systemelementen, die in dem kritischen Nutzungsprozess aus der Nutzungsphase involviert sind. Diese Systemelemente sind Funktionen und Komponenten. Die Betrachtung der Funktionen und Komponenten ist erforderlich für die Fehleranalyse und leitet sich aus den Kriterien zur Bildung der Zielstellung der Methodik aus dem Schritt 1 der MemogaFa ab. Der Ausfall einer Funktion, die den kritischen Nutzungsprozess realisiert, kann zur Nichterfüllung der grundfunktionalen Hauptanforderung führen (1. Kriterium). Das Weitern können aus den Komponenten (oder aus der Wechselwirkung zwischen den Komponenten mit anderen Faktoren) aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften potentielle Fehler mit Personenschaden entstehen (2. Kriterium).

Effekte	Produktsystem Modell
Ereignisse	Umweltfaktoren

Die Effekte resultieren aus den physikalischen Eigenschaften der Komponenten oder aus der Wechselwirkung zwischen Komponenten, Funktionen, Ereignissen und Umweltfaktoren. Sie können bspw. in Form von elektromagnetischen Feldern, Elektrostatik, Magnetismus, Formschluss oder Druck auftreten. Bei der Fehleranalyse sollten die Effekte nicht vernachlässigt werden, denn es besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Effekten, Funktionen und Komponenten, wie Zingel [Zingel 2013] und Breidert [Breidert 2007] nachgewiesen haben. In seiner Betrachtung unterscheidet Breider zwischen den nutzbaren Effekten und den Störeinflüssen (die auch als Effekte angesehen werden können) (vgl. Tabelle 17).

Tabelle 17: Zusammenhang zwischen Funktionen, Komponenten und physikalischen Effekten [in Anlehnung an Breidert 2007, S. 39]

funktionale Ebene	physikalische Ebene			
	Funktion	Ausprägung		Nutzbare Effekte
Energie leiten	mechanische Energie	Festkörper	Adhäsion Formschluss Oberflächenspannung Unterdruck Aero-/ Hydrodynamik Reibung Gravitation Elektrostatik Magnetismus	Elastizität Trägheit Spiel Reibung Verschleiß Ermüdung
		Fluid	Formschluss Elektrostatik Magnetismus kinetische Energie	Kompressibilität Trägheit Strömungsverluste Leckage Ermüdung
	elektrische Energie		elektrischer Widerstand Supraleitung Korona-Effekt Elektrolyt Permittivität	Kapazität Induktivität Widerstandsverluste Kriechströme
	magnetische Energie		Permeabilität	Widerstandsverluste Wirbelströme Magnetisierung
	elektromagnetische Energie		elektromagnetische Felder	Widerstandsverluste Ladungsverluste
	optische Energie		Lichtausbreitung	Absorption
	thermische Energie		Wärmeleitung Konvektion Wärmestrahlung	Wärmeverluste
Stoff leiten	fest	starr	Adhäsion Formschluss Gravitation Elektrostatik Magnetismus kinetische Energie	Verschleiß Reibung
		elastisch		
		schüttbar		
	flüssig		Formschluss Gravitation Elektrostatik Magnetismus kinetische Energie	Strömungswiderstand Leckage
gasförmig		Formschluss	Strömungswiderstand Leckage	

Dabei ist zu erwähnen, dass die sogenannten „nutzbaren“ Effekte sich in einem anderen Kontext, auch störend auswirken können. Ein Beispiel hierzu sind die elektromagnetischen Felder. Diese werden in Tabelle 17 als nutzbarer Effekt erwähnt, aber aus dem Blickwinkel des Themas „Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)“ können elektromagnetische Felder, die aufgrund der Übertragung hoher Energie entstehen, eine potentielle Gefährdung für die Sicherheit und Gesundheit von

Menschen (Personenschaden) darstellen. Außerdem können sie sich „zerstörerisch“ auf elektronische Komponenten auswirken, welche auf elektromagnetische Felder empfindlich reagieren. Dieser Zusammenhang wird im „Beeinflussungsmodell“ von Kampker verdeutlicht [Kampker et al. 2013].

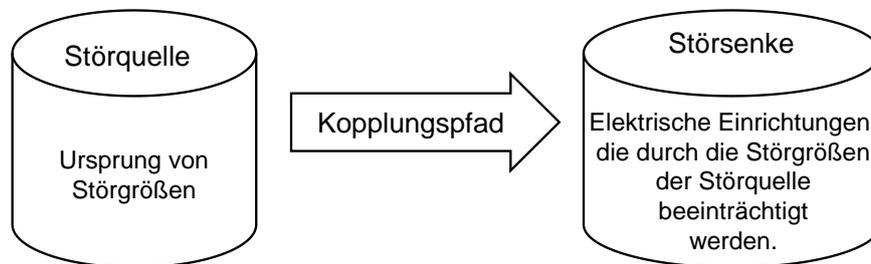


Abbildung 34: EMV - Beeinflussungsmodell [in Anlehnung an Kampker et al. 2013]

Wie in Abbildung 34 gezeigt, sind beim Auftreten einer Störung durch elektromagnetische Felder drei Faktoren involviert:

- Störquelle (Komponenten, die potentielle Störungen verursachen können),
- Störsenke (z. B. die empfindliche Elektronik eines Systems) und
- Kopplungspfad (z. B. ein Aufladungsprozess, bei dem hohe Energie entsteht).

Dieses Beispiel zeigt wie aus nutzbaren Effekten unter bestimmten Bedingungen negative Störeinflüsse entstehen können, die bei der ganzheitlichen Fehleranalyse zu beachten sind. In der Fachliteratur zur PE in der Konstruktion, gibt es unterschiedliche Quellen für die Kategorisierung und Systematisierung von Effekten. Eine gute Übersicht darüber liefert Feldhusen et al. im Pahl/ Beitz Konstruktionslehre [Feldhusen et al. 2013, S. 375, vgl. Tabelle 18]. Weitere ausführlichen Listen mit physikalischen Effekten sind auch bei Lindemann und Ponn [Lindemann und Ponn 2011, S. 344 ff.] zu finden.

Tabelle 18: Beispiele von physikalischen Effekten, Energiearten und Erscheinungsformen [in Anlehnung an Feldhusen et al. 2013, S. 375]

Ordnernde Gesichtspunkte: Energiearten, physikalische Effekte und Erscheinungsformen	
Merkmale:	Beispiele:
Mechanisch:	Gravitation, Trägheit, Fliehkraft
Hydraulisch:	hydrostatisch, hydrodynamisch
Pneumatisch:	aerostatisch, aerodynamisch
Elektrisch:	elektrostatisch, elektrodynamisch, induktiv, kapazitiv, piezoelektrisch, Transformation, Gleichrichtung
Magnetisch:	ferromagnetisch, elektromagnetisch
Optisch:	Reflexion, Brechung, Beugung, Interferenz, Polarisierung, Infrarot, sichtbar, ultraviolett
Thermisch:	Ausdehnung, Bimetalleffekt, Wärmespeicher, Wärmeübertragung, Wärmeleitung, Wärmeisolierung
Chemisch:	Verbrennung, Oxidation, Reduktion, auflösen, binden, umwandeln, Elektrolyse, exotherme, endotherme Reaktion
Nuklear:	Strahlung, Isotopen, Energiequelle
Biologisch:	Gärung, Verrottung, Zersetzung

Effekte	Produktsystem Modell
Ereignisse	Umweltfaktoren

Der dritte Quadrant beinhaltet Ereignisse, welche im kritischen, potentiellen Nutzungsprozess auftreten können. Die Wichtigkeit der Ereignisse und deren Auswirkungen in der Nutzungsphase eines PS werden in vielen wissenschaftlichen Arbeiten postuliert. Bspw. spielen die Ereignisse eine wichtige Rolle in den Vorgehenskonzepten aus den Dissertationen von Mamrot und Schlund [Mamrot 2014, S. 66; Schlund 2011, S. 67]. Im Kontext zur Fehleranalyse werden unerwartete Vorfälle wie z. B. ein Autounfall, eine Explosion oder eine Katastrophe als Ereignisse definiert. Dabei können Ereignisse, ähnlich wie Effekte, aus einer Zusammenwirkung von Komponenten, Funktionen und Umweltfaktoren entstehen. Aus diesem Grund werden die Ereignisse getrennt von Umweltfaktoren betrachtet.

Effekte	Produktsystem Modell
Ereignisse	Umweltfaktoren

Obwohl die Umweltfaktoren eine direkte Auswirkung auf das PSM in der Nutzungsphase haben, werden diese bei vielen MdF nicht berücksichtigt (vgl. FMEA). Zwar werden Umweltfaktoren bei Ishikawa beachtet, allerdings nur als einzelne Einflussfaktoren (Kategorie „Mitwelt“ aus dem Ishikawa-Diagramm). Eine Analyse hinsichtlich der Wechselwirkungen zwischen Umweltfaktoren und PS ist nicht vorgesehen. Prinzipiell sollte in den vier Quadranten der Wechselwirkungen folgendes vorhanden sein:

- Alle Komponenten und Funktionen, die im kritischen, potentiellen Nutzungsprozess involviert sind,
- Effekte und Ereignisse, die im kritischen, potentiellen Nutzungsprozess auftreten können und
- Umweltfaktoren, die das PSM beeinflussen (vgl. Abbildung 35).

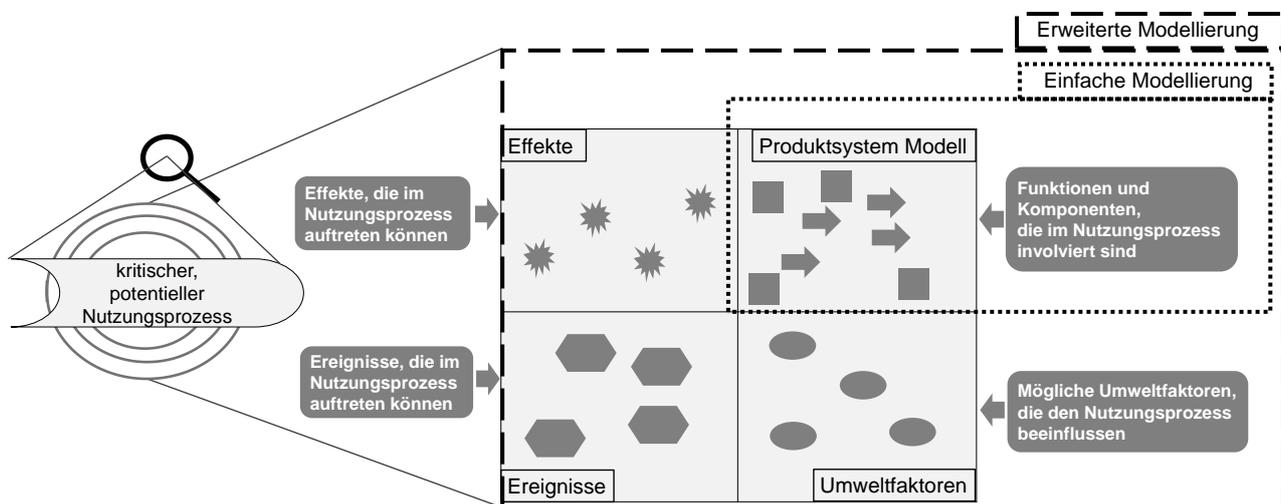


Abbildung 35: Ausgefüllte Quadranten der Wechselwirkungen [Eigene Darstellung]

Mit der Vervollständigung der vier Quadranten endet die erste Phase zur Entwicklung der Memog-aFa. Die Quadranten der Wechselwirkungen beinhalten alle notwendigen, modellbasierten Informationen aus der einfachen und erweiterten Modellierung, die für die Durchführung der ganzheitlichen Fehleranalyse erforderlich sind.

Methoden und Tool zur Umsetzung des vierten Schrittes der Methodik:

- Quadranten der Wechselwirkungen mit Faktoren, die zu potentiellen Fehlern führen können (**Neues Tool**) und
- Expertenbefragung (oder Experteninterview), hinsichtlich der Identifizierung von möglichen Effekten, Ereignissen und Umweltfaktoren.

Ergebnisse:

- **Umweltfaktoren, Effekte, Ereignisse, Komponenten und Funktionen**, die für den kritischen Prozess aus Schritt 3 **relevant** sind, und
- **Ausgefüllte** Quadranten der Wechselwirkungen.

3.1.2 Phase B: Ganzheitliche Fehleranalyse (Vom Groben zum Detail)

In der zweiten Phase zur Entwicklung der Methodik wird die ganzheitliche Fehleranalyse angewendet, um potentielle Fehler in der Nutzungsphase zu identifizieren. Dabei werden die Fehler von einer groben bis zu einer detaillierten Informationsebene beschrieben und analysiert. Die grobe Informationsebene bildet die erweiterte Modellierung bzw. die Quadranten der Wechselwirkungen. Mit dem Fokus auf den kritischen, potentiellen Nutzungsprozess können innerhalb der Quadranten mehrere potentielle Fehlernetze identifiziert und transparent dargestellt werden. In diesem Zusammenhang können einzelne Fehlernetze auch als Szenarien angesehen werden. D. h. aus einem Nutzungsprozess heraus, können mehrere Szenarien in die Zukunft projiziert werden (vgl. Abbildung 36).

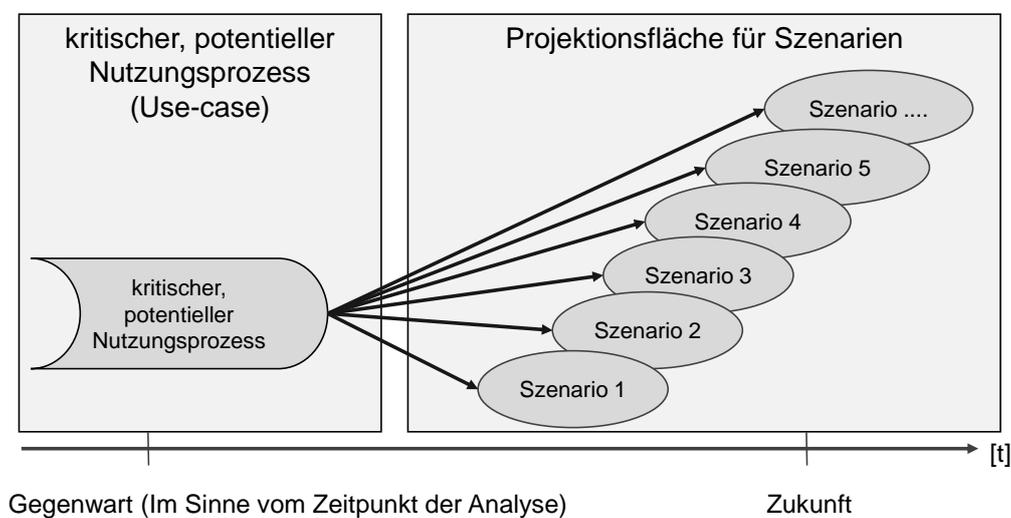


Abbildung 36: Zusammenhang zwischen dem Nutzungsprozess und Szenarien [Eigene Darstellung, in Anlehnung an Gausemaier und Fink 1999]

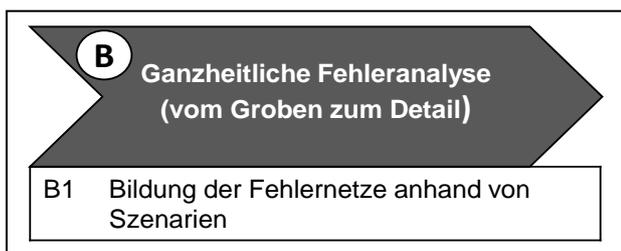
Gausemeier, Fink und Weilkiens bezeichnen ein Szenario als „eine konkrete Ausprägung eines je nach Fachdisziplin weit in die Zukunft gerichteten Anwendungsfalls (Use-Case), welcher kausale Zusammenhänge betrachtet“ (Weilkiens 2015, S. 36; Gausemeier und Fink 1999, S. 80). Es sind „kausale Zusammenhänge“ (z. B. zwischen Fehlerursachen und Fehlerauswirkungen), die das Szenario zu einem wirkungsvollen Instrument für die Fehleranalyse machen, denn damit können potentielle Fehlernetze identifiziert werden. Daher heißt der erste Schritt in der Phase B und der **fünfte Schritt** in der Methodik „**Bildung der Fehlernetze anhand von Szenarien**“.

Nach der Fehleridentifikation auf der groben Informationsebene soll dieser, gemäß des Top-Down-Prinzips, auf einer detaillierten Informationsebene genauer beschrieben und analysiert werden. Denn nur durch eine detailliertere Beschreibung mit ausreichenden Informationen ist es möglich, den Fehler zu verstehen und daraus geeignete Maßnahmen abzuleiten. Dafür soll ein Tool entwickelt werden, das auf Basis der Ergebnisse aus der Literaturanalyse zu den Fehlerdefinitionen, -arten und -klassifikationen (vgl. Abschnitte 2.1 und 2.3) aufgebaut werden soll. Darum wird der

sechste Schritt der Methodik „**Überführung der Fehlernetze in das Tool zur ganzheitlichen Fehlerbeschreibung und Priorisierung von kritischen Fehlern**“ genannt.

Zudem sollen im sechsten Schritt anhand des Tools potentielle Fehler aufgrund ihrer Kritikalität (oder Risiko des Fehlers) priorisiert werden. Wenn die priorisierten Fehler nicht vollständig analysiert und beschrieben sind, dann können diese anhand der im Kapitel 2.4 vorgestellten MdF weiterführend untersucht werden. Dies ermöglicht zum einen, Informationen aus den Quadranten der Wechselwirkungen für die MdF zu nutzen und zum anderen, quantitative MdF zu verwenden, um datenbasierte Prognosen zu erstellen, insofern die erforderlichen Daten dafür vorhanden sind. Dieser Schritt kann aber, wegen der Abhängigkeit von der Datenverfügbarkeit aus der Nutzungsphase, als ein optionaler Schritt angesehen werden. Daher heißt der letzte, **optionale, siebte Schritt**: „**Anwendung einer geeigneten Methode der Fehleranalyse für die weiterführende Analyse eines kritischen Fehlers aus dem letzten Schritt**“.

Im Folgenden werden die letzten drei Schritte aus der zweiten Phase (B) zur Entwicklung der Megafa konkretisiert.



Auf Basis der vier Quadranten der Wechselwirkungen können Fehlernetze anhand von Szenarien **im fünften Schritt** der Methodikentwicklung erstellt werden. Dabei entspricht jedes Fehlernetz einem Szenario (siehe Abbildung 37). Bei der Erstellung der Fehlernetze ist es wichtig, alle relevanten Elemente

in den Quadranten (Komponenten und Funktionen, Umweltfaktoren, Effekte und Ereignisse) in ihren Wechsel- und Zusammenwirkungen zu berücksichtigen. Daher soll bei der Erstellung von Fehlernetzen idealerweise ein interdisziplinäres Entwicklerteam, das über ein umfassendes Wissen zum Produktsystem verfügt, eingebunden sein. In erster Linie ist es die Expertise des Entwicklerteams, die dazu beiträgt, valide Ergebnisse zu erzielen.

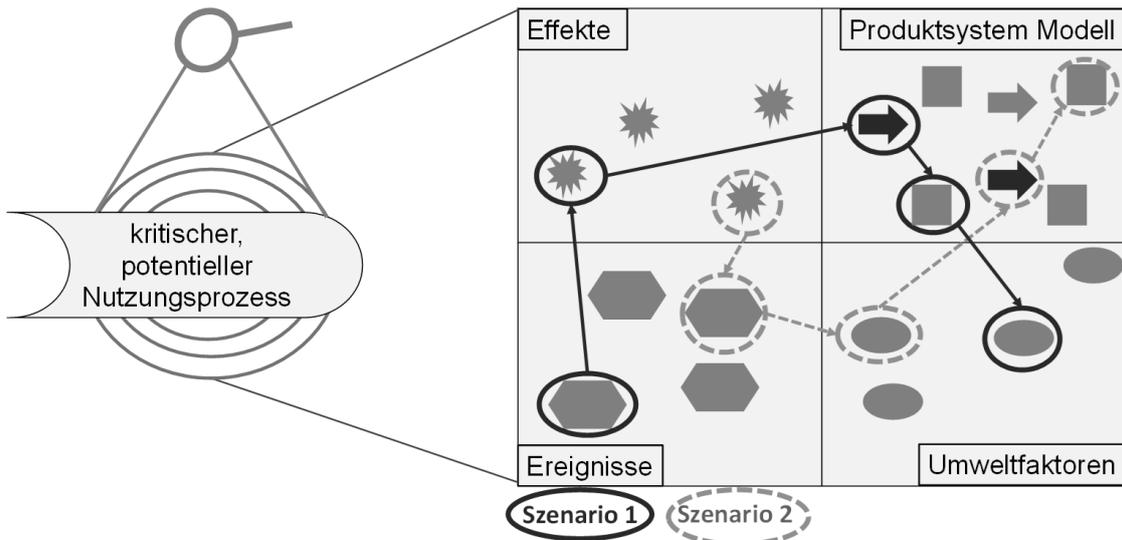


Abbildung 37: Bildung der Fehlernetze anhand Szenarien [Eigene Darstellung]

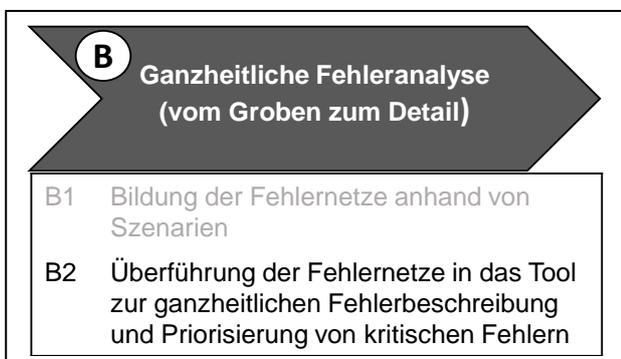
Die resultierenden Fehlernetze aus den Quadranten der Wechselwirkungen liefern den Input für den nächsten Schritt der Methodik, in dem die potentiellen Fehler aus den Fehlernetzen auf einer detaillierten Informationsebene beschrieben werden.

Methodik und Tool zur Umsetzung des fünften Schrittes der Methodik:

- Expertenbefragung und
- Szenarien in den Quadranten der Wechselwirkungen, die zur Bildung unterschiedlicher Fehlernetze mit potentiellen Fehlern verwendet werden (**Neues Tool**).

Ergebnisse:

- **Chaotische, unstrukturierte Fehlernetze** mit potentiellen Fehlern (Fokus auf die identifizierten Fehlerketten aus den Szenarien/ **2. Informationsfilter**) und
- **unfertige Beschreibung** von potentiellen Fehlerursachen und -auswirkungen.



Mit Hilfe des **sechsten Schrittes** lassen sich die chaotischen und unstrukturierten Fehlernetze strukturieren sowie detailliert beschreiben. Dafür wurde ein weiteres **Tool neu entwickelt**, nachfolgend „**Tool zur ganzheitlichen Fehlerbeschreibung**“ benannt. An dieser Stelle ist es wichtig, den Unterschied zwischen **ganzheitlicher Fehleranalyse** und **ganzheitlicher Fehlerbeschreibung** zu

erläutern. Die **ganzheitliche Fehleranalyse** baut auf den vorbereitenden Schritten A1 bis A4 aus der ersten Phase auf und wird im Schritt B1 (Bildung der Fehlernetze anhand von Szenarien) anhand

der Quadranten der Wechselwirkungen durchgeführt, während die **ganzheitliche Fehlerbeschreibung** erst durch **das Tool zur ganzheitlichen Fehlerbeschreibung** ermöglicht wird.

Die Entwicklung des Tools fußt auf der Synthese (bzw. Bündelung) und Komprimierung aller Ergebnisse aus Kapitel 2.1. Bei der Analyse der Definitionen von Fehlern wurden sowohl Gemeinsamkeiten (vgl. der Bezug zur Funktion oder zum Funktionsausfall) als auch Unterschiede (vgl. nicht erfüllte Anforderungen, Abweichungen von Eigenschaften, usw.) festgestellt (vgl. Tabelle 1). Alle diese „Blickwinkel“ auf den Begriff „Fehler“ werden im Tool gebündelt, um Fehler detailliert, strukturiert und ganzheitlich zu beschreiben.

Zudem wird das Tool inhaltlich durch die Ansätze zur Strukturierung und Kategorisierung von Fehlerarten aus dem Kapitel 2.1 bestimmt. Anders formuliert, **wird die Essenz der Literaturanalyse** (siehe Tabelle 1 und Tabelle 2) **in das Tool integriert**, um eine detaillierte und umfassende Fehlerbeschreibung zu gewährleisten, welche es bisher in dieser Form nicht gegeben hat, **da alle Ergebnisse aus der umfassenden Literaturanalyse verwertet und synthetisiert werden**.

Einige Kategorien aus der Literaturanalyse bezüglich der Beschreibung von Fehlern liegen jedoch außerhalb des Schwerpunkts der Forschung und werden somit im weiteren Verlauf nicht weiter berücksichtigt. Dazu zählen die Unterteilung der Fehlerarten in Software-, Hardwarefehler und Fehler durch Umwelteinflüsse nach Halang und Krishna [Halang 2013, S. 21; Krishna 2008, S. 624]. Überdies werden die Formen des Auftretens von Fehlern (systematisch, zufällig oder sporadisch) nach Badke-Schaube [Badke-Schaub et al. 2012] nicht in das Tool integriert, da für diese Aussagen statistische Daten erforderlich sind, die in den frühen Phasen der PE nicht verfügbar sind. Für die Entwicklung des Tools wurde ein Vorgehen konzipiert, welches in Abbildung 38 skizziert wird.

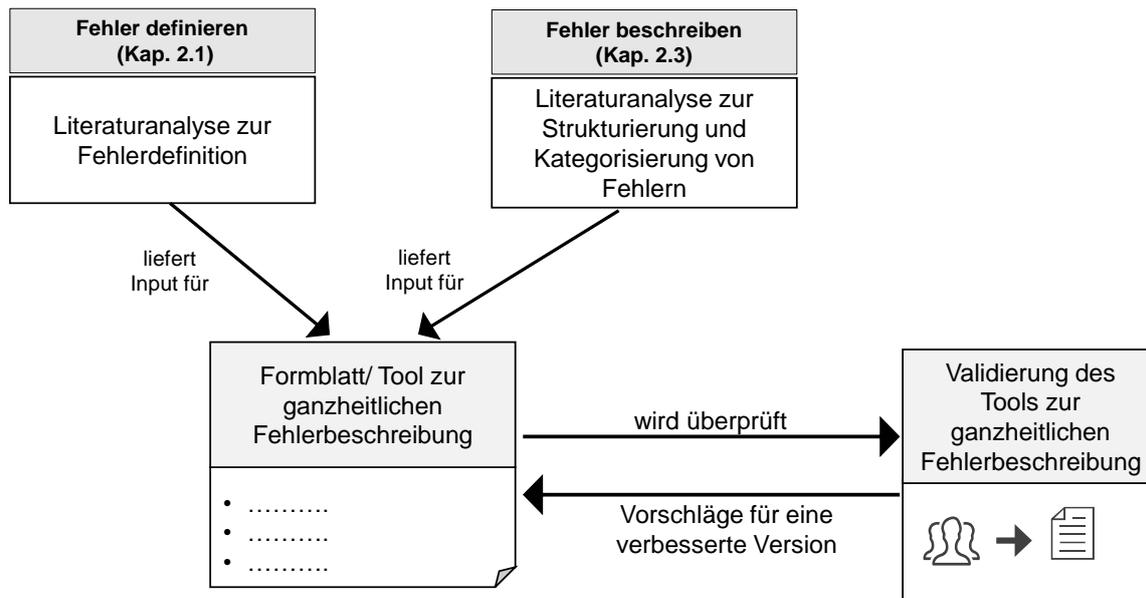


Abbildung 38: Vorgehen für die Entwicklung des Tools zur ganzheitlichen Fehlerbeschreibung [eigene Darstellung]

In Abbildung 38 wird veranschaulicht, wie die Ergebnisse aus der Literaturanalyse (Definition sowie Strukturierung und Kategorisierung von Fehlern) den Input für das Tool zur ganzheitlichen Fehlerbeschreibung liefern. Dabei erfolgte die Entwicklung des Tools iterativ, in der Zusammenwirkung mit einer Validierung (vgl. Abbildung 38). Aus der Validierung konnten Vorschläge von Experten gewonnen werden, die zu einer sukzessiven Verbesserung des Tools (über mehrere Versionen) geführt haben. Die Validierung erfolgte anhand von Szenarien mit Fehlern aus potentiellen Fehlerursachen und -auswirkungen.

Diese Szenarien, sowie auch das Tool, wurden im Rahmen des DFG-Forschungsprojektes KAUSAL¹⁰ erstmalig entwickelt. Zudem wurde das Tool in einem Laborversuch mithilfe von zwanzig Szenarien erprobt. Ein Beispielszenario dazu ist im Anhang F dargelegt.

Bei der gesamten Entwicklung des Tools, gab es mehrere, iterative Prozesse, welche eine ständige Verbesserung des Tools bewirkt haben. Anfangs wurde die erste Version im Papierformat erstellt. Danach gab es eine digitale, zweite Version als WORD-Format. Anschließend wurde die dritte Version des Tools in Excel mittels Visual Basic for Applications (VBA) programmiert.

¹⁰ KAUSAL (FKZ: WI 1234/21-1) ist eine Methodik zur transparenten Darstellung von Kausalketten der Fehlerentstehung in komplexen Systemen. Die Kausalketten wurden teilsystem- und fachdisziplinübergreifend analysiert, um darauf aufbauend Lösungsansätze für die Produktentwicklung zu erarbeiten (Projektlaufzeit 02.01.2016 bis 31.03.2019).

Die Auswahl fiel auf Excel bzw. VBA, zum einen, weil Excel sowohl in der Wissenschaft als auch in der Industrie stark genutzt wird, und zum anderen wegen des vorteilhaften Datentransfers zwischen Excel und LOOME0. Das Tool ist in fünf Bereiche (Fenster bzw. Eingabemasken) unterteilt, welche in Abbildung 39 übersichtlich dargestellt werden. Die **fünf Bereiche** des Tools werden nachfolgend einzeln erklärt:

1. Allgemeine Informationen
2. Fehlerursachen
3. Wirkung der Fehlerursache(n)
4. Fehlerauswirkungen
5. Fehlerrisiko



Abbildung 39: VBA-Excel basiertes Tool zur ganzheitlichen Fehlerbeschreibung (Version 1.3)

Der **erste Bereich** des Tools (vgl. Abbildung 40) beinhaltet **allgemeine Informationen** wie Szenario-ID, Szenario-Beschreibung, Datum sowie eine Hilfestellung bezüglich der Anwendung. Außerdem werden überarbeitete Versionen mithilfe der Option „Versionsstand“ kenntlich gemacht und dokumentiert (vgl. Abbildung 40).

Seite 1

Allgemeine Informationen Hilfe

Auf dieser Seite werden allgemeine Informationen, wie die Szenario-ID, der Verfasser, die aktuelle Version oder das aktuelle Datum abgefragt. Diese Angaben sind verpflichtend, um eine rückverfolgbare Dokumentation zu gewährleisten.

Hinweis:
Sollten Sie einen Fehler bearbeiten, achten Sie vor allem darauf, dass Sie den Versionsstand aktualisieren. Andernfalls wird ein Speichern des Datensatzes nicht möglich sein.

Szenario-ID (Zahl):

Szenario-Beschreibung:

Versionsstand (Großbuchstabe):

Datum der Bearbeitung: 06.03.2020

Name des Verfassers:

Abteilung des Verfassers:

E-Mail des Verfassers:

Zurück Abbruch Weiter

Abbildung 40: Erster Bereich des VBA-Excel basierten Tools zur ganzheitlichen Fehlerbeschreibung

Im **zweiten Bereich** des Tools, dargestellt in Abbildung 41, werden mögliche **Fehlerursachen** beschrieben. Dabei bestimmt die Tabelle 1 mit den unterschiedlichen Definitionen zum Begriff „Fehler“ (Kapitel 2.1.1.1) die Struktur des Fensters. Somit werden alle relevanten Inhalte aus Tabelle 1 in die Beschreibung der Fehlerursache(n) anhand des Tools integriert. Demzufolge bezieht sich die Auswahl unter dem Begriff „Funktionsfehler“, oben links im Fenster (Abbildung 41), u. a. auf die Definitionen vom Fehler als „nicht erfüllte Funktion“ oder „Funktionsausfall“ [vgl. Bertsche et al 2009, S. 28; IEC 62059-31-1, S. 10; ISO 26262-1, S. 7; IEC 61508; Isermann 2006, S 20]. Die Auswahl beim Begriff „Komponentenfehler“ im Sinne von einem primären oder sekundären Komponentenausfall ist aus der ISO 26262 [ISO 26262-Teil 1, 2011, S. 3] und DIN 25424 [DIN 25424-Teil 1, 1981,

S. 2] entnommen worden. Mit dem Fokus auf das Qualitätsmanagement spielt die Fehlerdefinition als „Nichterfüllte Anforderung“ eine wichtige Rolle [DIN EN ISO 9000:2015, S. 40]. Diese ist unter dem Begriff „Anforderungsfehler“ wählbar (Abbildung 41). Da der Nutzungsprozess im Vordergrund der Fehleranalyse steht, wird auch nach möglichen Prozessfehlern gefragt. Zudem fungieren auch Umweltfaktoren (Temperatur, Feuchtigkeit) oder Ereignisse (Autounfall oder Explosion) als potentielle Fehlerursachen. Für den Fall einer Kombination oder Zusammenwirkung von Fehlerursachen, ist eine mehrfache Auswahl möglich.

Seite 2

Fehlerursachen ID Version Hilfe

Produktsystemmodell

Funktionsfehler:
Auswahl: (1) Funktionsausfall, (2) Nicht gewollte Funktion
Beschreibung:

Komponentenfehler:
Auswahl: (1) Primärer Komponentenausfall, (2) Sekundärer Komponentenausfall
Beschreibung:

Anforderungsfehler:
Auswahl: (1) Nicht erfüllte Anforderung, (2) Keine der genannten Optionen
Beschreibung:

Prozessfehler:
Auswahl: (1) Fehler im Prozess, (2) Keine der genannten Optionen
Beschreibung:

Umweltfaktoren
Auswahl: (1) Temperatur, (2) Feuchtigkeit
Beschreibung:

Ereignisse
Auswahl: (1) Autounfall, (2) Explosion
Beschreibung:

Zurück Abbruch Weiter

Abbildung 41: Zweiter Bereich des VBA-Excel basierten Tools zur ganzheitlichen Fehlerbeschreibung

Neben den Fehlerursachen sind zudem die Effekte von Fehlern aufzunehmen, was in **dritten Bereich** des Tools (vgl. Abbildung 42) erfolgt. Die Effekte werden erst jetzt betrachtet, da diese immer

nur aus der Fehlerursache folgern, wie Zingel [Zingel 2013] anhand der Zusammenhänge von Ursachen und Wirkungen im Kontext zur Funktion gezeigt hat (vgl. Abbildung 8). Daher wird dieser Bereich als **Wirkung der Fehlerursache(n)** betitelt (vgl. Abbildung 42).

Seite 3

Wirkung der Fehlerursache(n) ID Version **Hilfe**

Produktsystemmodell

Funktionsfehler:

Auswahl Beschreibung

(1) Funktionsausfall
(2) Nicht gewollte Funktion

Komponentenfehler:

Auswahl Beschreibung

(1) Primärer Komponentenausfall
(2) Sekundärer Komponentenausfall

Anforderungsfehler:

Auswahl Beschreibung

(1) Nicht erfüllte Anforderung
(2) Keine der genannten Optionen

Prozessfehler:

Auswahl Beschreibung

(1) Fehler im Prozess
(2) Keine der genannten Optionen

Umweltfaktoren

Auswahl Beschreibung

(1) Temperatur
(2) Feuchtigkeit

Ereignisse

Auswahl Beschreibung

(1) Autounfall
(2) Explosion

Effekte

Auswahl Beschreibung

(1) Mechanisch
(2) Hydraulisch

Zurück **Abbruch** **Weiter**

Abbildung 42: Dritter Bereich des VBA-Excel basierten Tools zur ganzheitlichen Fehlerbeschreibung

Im **vierten Bereich** des Tools (Abbildung 43) lassen sich unterschiedliche **Fehlerauswirkungen** auswählen. Die Auswirkungen auf das technische System werden den folgenden drei Systemebenen zugeordnet: Gesamtsystemebene (auch globale Auswirkungen), Teilsystemebenen (auch lokale Auswirkungen) und Bauteilebene [vgl. Bertsche 2009, S. 56; Reif 2012, S. 258]. Dabei wird das Ausmaß der Fehlerauswirkungen je größer, desto höher die Systemebene ist. Das Kriterium (1) aus der Frage „Welche potentiellen Fehler können zu Personenschaden führen?“ (Schritt 1 der Memog-

aFA) wird ebenfalls in das Tool durch die Auswahl „Fehlerauswirkungen auf den Menschen (Personenschaden)“ implementiert. Zusätzlich werden die Fehlerauswirkungen aus der Sicht der Stakeholder beleuchtet (vgl. Abbildung 43).

Im **fünften Bereich** des Tools wird das **Fehlerrisiko** anhand der Risikomatrix quantitativ und subjektiv ermittelt. Mit der Risikomatrix werden Fehler aus den Szenarien priorisiert (vgl. Abbildung 43). Dabei wird das Risiko als das Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß definieren. Diese Bewertungsmethode findet in vielen Ingenieurbereichen Anwendung und wird in Fachliteratur und Normen empfohlen [vgl. Schnieder 2013, S. 146-147; DIN ISO/TR 14121; VDA 2000; Bertsche 2009].

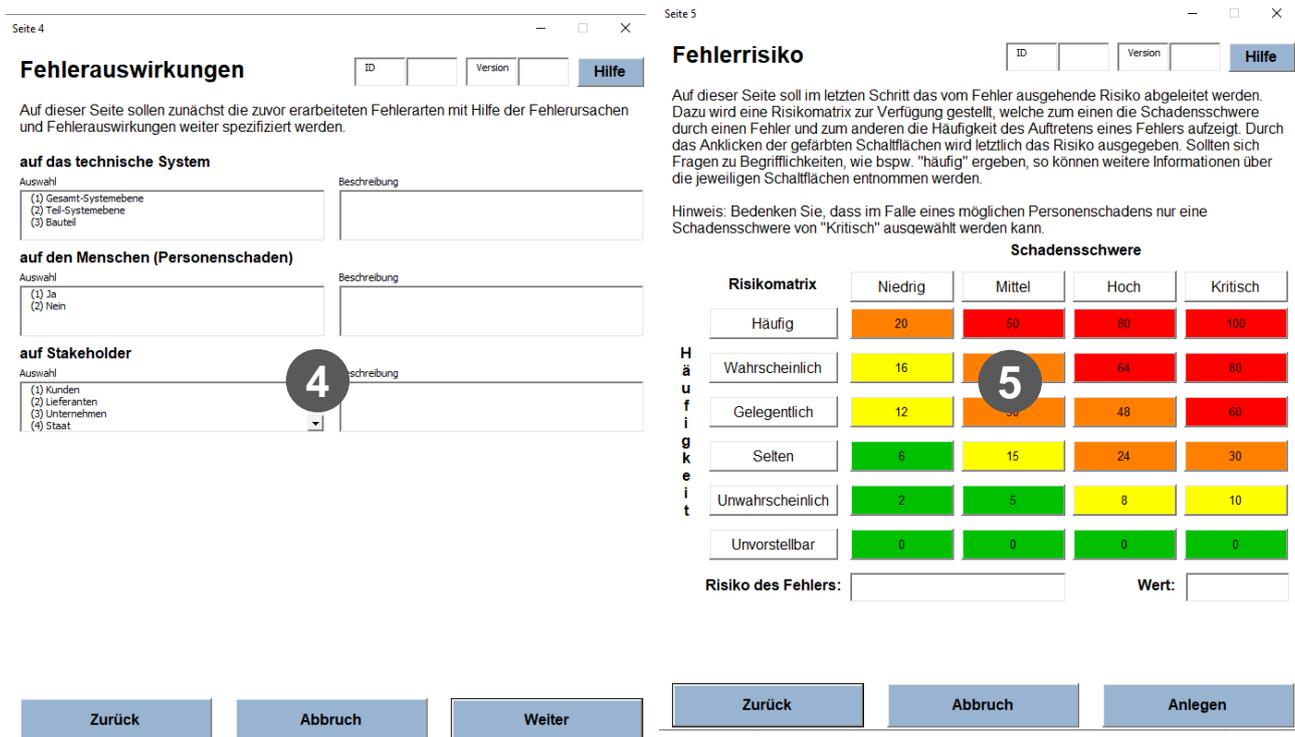


Abbildung 43: Vierter und fünfter Bereich des Tools zur ganzheitlichen Fehlerbeschreibung

Die Risikomatrix ist ein bekanntes „Instrument“ für die Priorisierung von Fehlern und wird auch bei der FMEA in Form eines sogenannten Risikographen verwendet [vgl. VDA 2006, S. 135]. Allerdings unterscheidet sich das vorgestellte Tool von der FMEA: **Der Unterschied zwischen dem Tool zur ganzheitlichen Fehlerbeschreibung und der FMEA** ist zum einen, dass der **Input für das Tool ein Fehlernetz aus Kombinationen von Ursachen und Auswirkungen darstellt** und zum anderen, dass **Fehler im Tool einheitlich sowie fundiert beschrieben werden**. Bei der FMEA wird weder die Kombination aus Ursachen und Auswirkungen der Fehler [Preiss 2009; DIN EN 60812] noch eine einheitliche Fehlerbeschreibung vorgesehen. Als nächstes werden die abgebildeten Fehlernetze aus dem fünften Schritt in das Tool zur detaillierten Fehlerbeschreibung überführt.

Die Schnittstelle für diese „Überführung“ bildet die ganzheitliche Beschreibung einer Fehlerentstehung (siehe Abbildung 44).

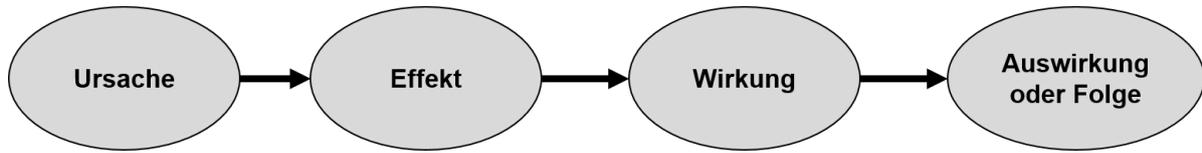


Abbildung 44: Ganzheitliche Beschreibung einer Fehlerentstehung [eigene Darstellung in Anlehnung an Westkämper 1997, Zingel 2013, S. 50]

Die Definition für einen ganzheitlichen Fehler lässt sich wie eine „Schablone“ verwenden, um die Fehlernetze zu formalisieren. Jeder Fehler oder Fehlerentstehung besteht aus Ursache, Effekt, Wirkung und Auswirkung oder Folge. **Die einzelnen Elemente aus einem Fehlernetz werden den Aspekten der Fehlerbeschreibung zugeordnet und durch das Tool zur Fehlerbeschreibung aus der groben in die detaillierte Informationsebene überführt** (vgl. Abbildung 45).

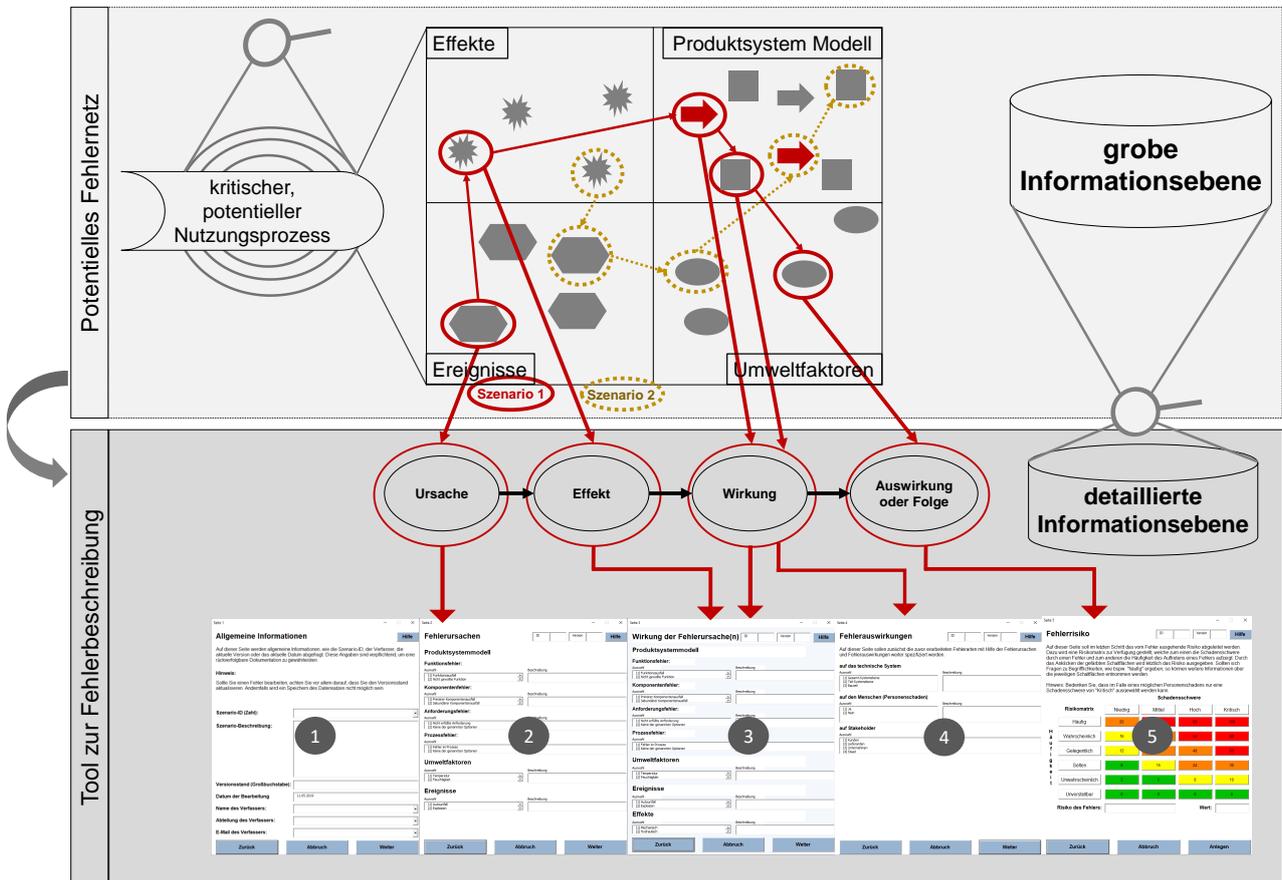


Abbildung 45: Überführung des Fehlernetzes aus Szenario 1 in das Tool zur Fehlerbeschreibung [Eigene Darstellung, mit Bezug auf die ganzheitliche Beschreibung einer Fehlerentstehung aus Kapitel 2.1.1.1]

Dadurch entsteht aus jedem erarbeiteten Fehlernetz eine formalisierte Fehlerbeschreibung im Tool, womit Fehler umfassend und konsistent beschrieben (vgl. die Bereiche 1 bis 4 des Tools) sowie

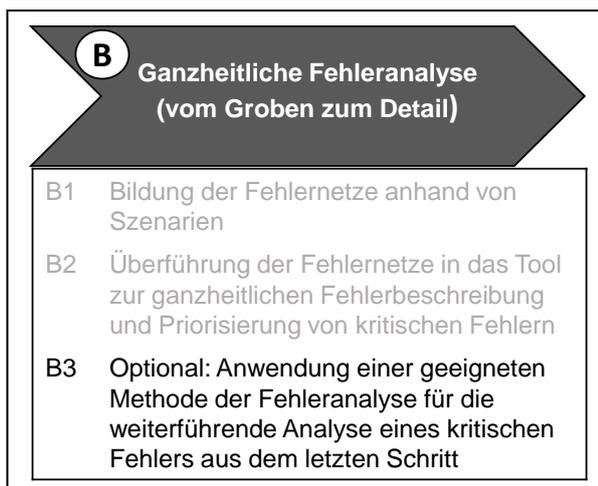
priorisiert werden (vgl. Bereich 5 des Tools). Zusätzlich werden die Inhalte dokumentiert, sodass diese für die weitere Verwendung verfügbar sind.

Methodik und Tool zur Umsetzung des sechsten Schrittes der Methodik:

- Quadranten der Wechselwirkungen (**Neues Tool**) und
- Tool der ganzheitlichen Fehlerbeschreibung (**Neues Tool**).

Ergebnisse:

- **Strukturierte, einheitlich** dokumentierte und **priorisierte Fehler**.
(Fokus auf die priorisierten Fehler mittels Informationsfilter),
- **detaillierte Beschreibung** von Fehlern anhand Ursache, Effekt, Wirkung und Auswirkung/Folge und
- **Dokumentation (Fehlerliste)** mit **priorisierten Fehlern** von potentiellen Fehlerursachen und -auswirkungen.



Dieser optionale und letzte, **siebte Schritt** der Methodik kommt zur Anwendung, wenn eines der folgenden zwei Kriterien zutreffend ist:

- 1)** Es konnten nicht alle Ursachen oder Auswirkungen für den am höchsten priorisierten Fehler gefunden werden, sodass eine weiterführende Analyse erforderlich ist.
- 2)** Es liegen konsistente Daten (Ausfallraten von Komponenten) für die Durchführung einer quantitativen Analyse vor.

Wenn eines der Kriterien zutreffend ist, dann können Informationen aus der erweiterten Modellierung und dem Tool der ganzheitlichen Fehlerbeschreibung für die Durchführung einer MdF genutzt werden. Für einen bidirektionalen Informationstransfer zwischen der erweiterten Modellierung (Quadranten der Wechselwirkungen) und den MdF, wurde eine sogenannte Beziehungsmatrix erarbeitet (vgl. Tabelle 19). Das Layout dafür basiert auf der Matrix für den Informationsaustausch zwischen FMEA und anderen MdF aus dem VDA Band 4 [vgl. VDA 2006, S. 151]. Die **neu entwickelte Beziehungsmatrix** zum **bidirektionalen Informationsaustausch** bietet eine gute Herangehensweise, um Informationen für die Durchführung einer MdF aus dem bereits vorhandenen „Wissensspeicher“ der erweiterten Modellierung zielgerichtet zu entnehmen. Auf diese Weise werden Zeit und Ressourcen gespart, zwei Faktoren, die im Unternehmen eine wichtige Rolle spielen.

Tabelle 19: Bidirektionaler Informationsaustausch zwischen der erweiterten Modellierung (Systemmodell, Ereignisse und Umweltfaktoren) und Methoden der Fehleranalyse [in Anlehnung an VDA 2006, S. 151]

Methoden der Fehleranalyse	DeCoDe-Systemmodell								Ereignisse	Umweltfaktoren
	Sichten				Relationen					
	Anforderungen	Funktionen	Prozesse	Komponenten	Energieübertrag (elektrisch)	Informationsfluss (Daten, Signale)	Kraftübertragung	Materialfluss		
Ishikawa				↗						↗
FMEA nach VDA		↗	↗	↗						
RBD		↗		↗	↗	↗				
FTA		↗		↗					↗	
ETA		↗		↗					↗	

Legende:

 Informationsfluss nur in eine Richtung (unidirektional)

 Informationsfluss in beide Richtungen (bidirektional)

Tabelle 19 zeigt, wie Informationen zwischen MdF und dem DeCoDe-Systemmodell sowie Ereignissen und Umweltfaktoren ausgetauscht werden können. Für die Durchführung der MdF (z. B. RBD oder FTA) können Komponenten-, Prozesse- und Funktionsstrukturen aus dem Systemmodell genutzt werden. Zugleich können die MdF Input für das DeCoDe-Systemmodell liefern. Ein fertiges RBD kann für den energetischen Transfer innerhalb der physikalischen Domäne (Komponenten-Komponenten Matrix) genutzt werden. Mithilfe der Ishikawa-Methode können Umweltfaktoren und durch FTA und ETA Ereignisse identifiziert werden. Die Ergebnisse aus durchgeführten MdF lassen sich in das DeCoDe-Systemmodell gezielt implementieren.

In der Matrix ist erkennbar, dass bei dieser Betrachtung die Effekte fehlen. Grund dafür ist, dass bei den meisten MdF die Effekte nicht berücksichtigt werden, sodass kein Informationsaustausch stattfinden kann.

Wie einen Informationsaustausch zwischen Systemmodell und MdF erfolgen kann, wird in der Abbildung 46 illustriert, wie Informationen aus einem Systemmodell für die Durchführung einer FMEA gezielt genutzt werden. Die FMEA wird an dieser Stelle ausgewählt, da diese MdF sowohl in der Wissenschaft als auch in der Praxis oft genutzt wird [Bertsche et al. 2009].

Wie der Abbildung 46 zu entnehmen ist, wird mittels der Umgebungsfunktion (Fokus) relevante Systemelemente (Prozesse, Komponenten und Funktionen) identifiziert und aus dem Produktsystemmodell (PSM) in das FMEA-Formblatt (Ausschnitt) implementiert.

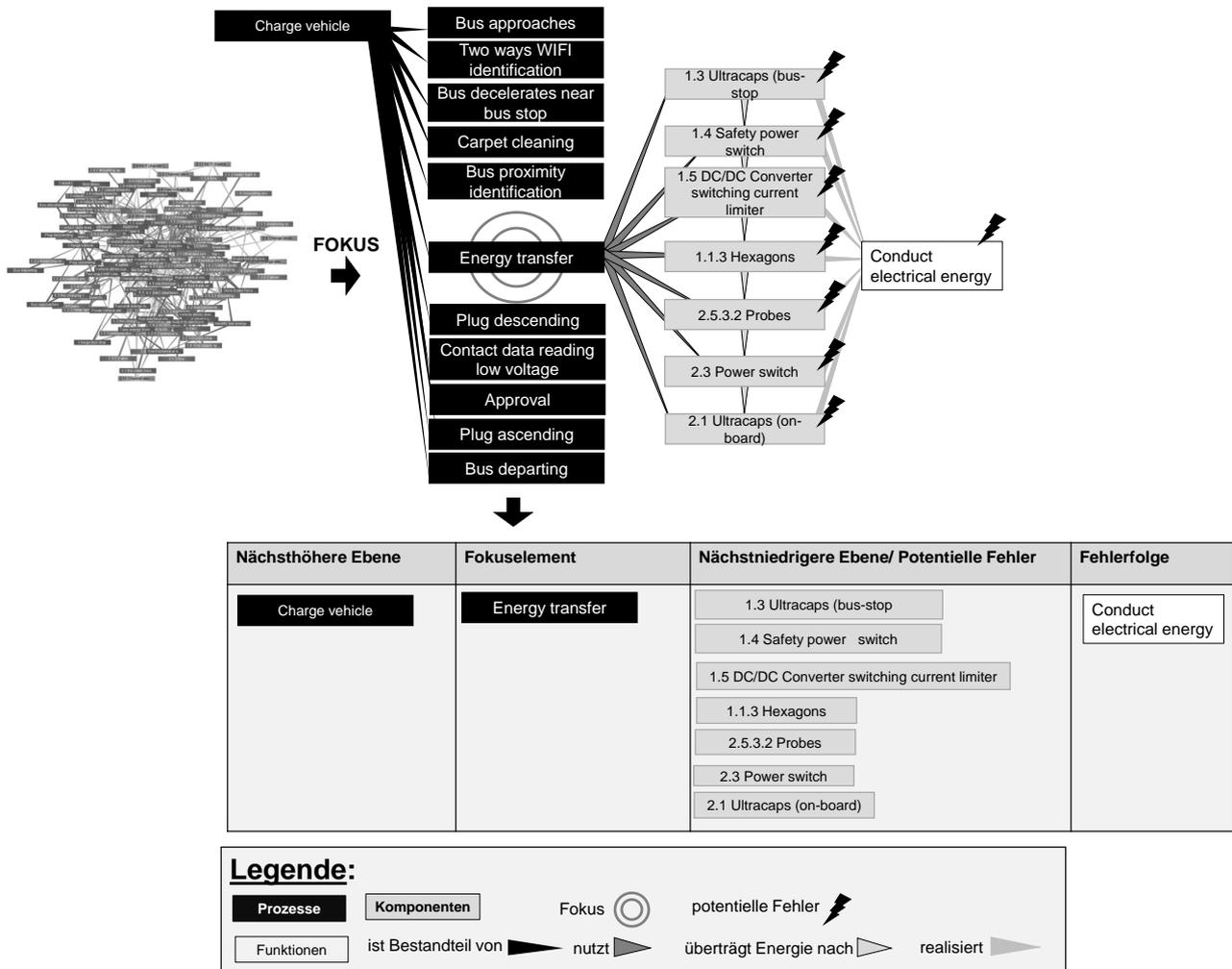


Abbildung 46: Prinzipdarstellung zur Implementierung von Informationen aus dem PSM in die FMEA (Eigene Darstellung, in Anlehnung an [Schlüter et al. 2018; AIAG und VDA 2019])

Damit kann nachgewiesen werden, dass die vernetzten Informationen aus dem PSM, effizienten Input für die Durchführung einer MdF (hier beispielhaft FMEA) liefern können.

Methodik und Tool zur Umsetzung des siebten Schrittes der Methodik:

- Matrix zum bidirektionalen Informationsaustausch zwischen Systemmodell und MdF (**Neues Tool**) und
- Methoden der Fehleranalyse (FTA, ETA usw.).

Ergebnisse:

- **Strukturierte, einheitlich dokumentierte und priorisierte Fehler** (Fokus auf die priorisierten Fehler mittels Informationsfilter),
- **detaillierte Beschreibung von Fehlern** anhand Ursache, Effekt, Wirkung und Auswirkung oder Folge und
- **Dokumentation (Fehlerliste) mit priorisierten Fehlern.**

3.2 Zwischenfazit

Die Essenz aus dem Kapitel 2 (Forschungsfelder 1 bis 4) fließt in die zwei Phasen (A und B) zur Entwicklung der neuen MemogaFa ein. Aus den Phasen sind sieben Schritte entstanden, die für die Anwendung der Methodik notwendig sind. **Für die Realisierung der einzelnen Schritte wurden insgesamt drei neue Tools entwickelt:**

- (1) Tool für die **Quadranten der Wechselwirkungen** (Schritt 4 der Methodik)
- (2) in VBA programmiertes **Tool für eine ganzheitliche Fehlerbeschreibung** (Schritt 6 der Methodik) und
- (3) **Beziehungsmatrix** für einen systematischen und zielgerichteten **Informationsaustausch zwischen dem Systemmodell und den MdF.**

Der **gesamte Verlauf zur Entwicklung der MemogaFa** ist in **Abbildung 47** dargestellt. Die Methodik besteht aus sieben Schritten mit einem zyklischen Ablauf. Der Verlauf ist zyklisch, weil das Wissen aus der ersten Anwendung der Methodik, mit dem Fokus auf den ersten priorisierten, kritischen Nutzungsprozess, für eine zweite Anwendung der Methodik, mit dem Fokus auf einen weiteren Nutzungsprozess, genutzt werden kann. Dadurch entsteht aus der Anwendung der MemogaFa ein kontinuierlicher Wissensspeicher, welcher für eine weitere Nutzung zur Verfügung steht.

Zusätzlich wird auch das Wissen über das PSM über mehrere Versionen erweitert werden (Produkt Systemmodell zum Zeitpunkt t_0 , t_1 , t_2 usw.). Dadurch können mehrere „Teilsysteme“ erstellt werden, die zusammen das Gesamtmodell ergeben, gemäß dem Prinzip der zeitlichen Veränderung eines Systemmodells nach Winzer [Winzer 2016, S. 133].

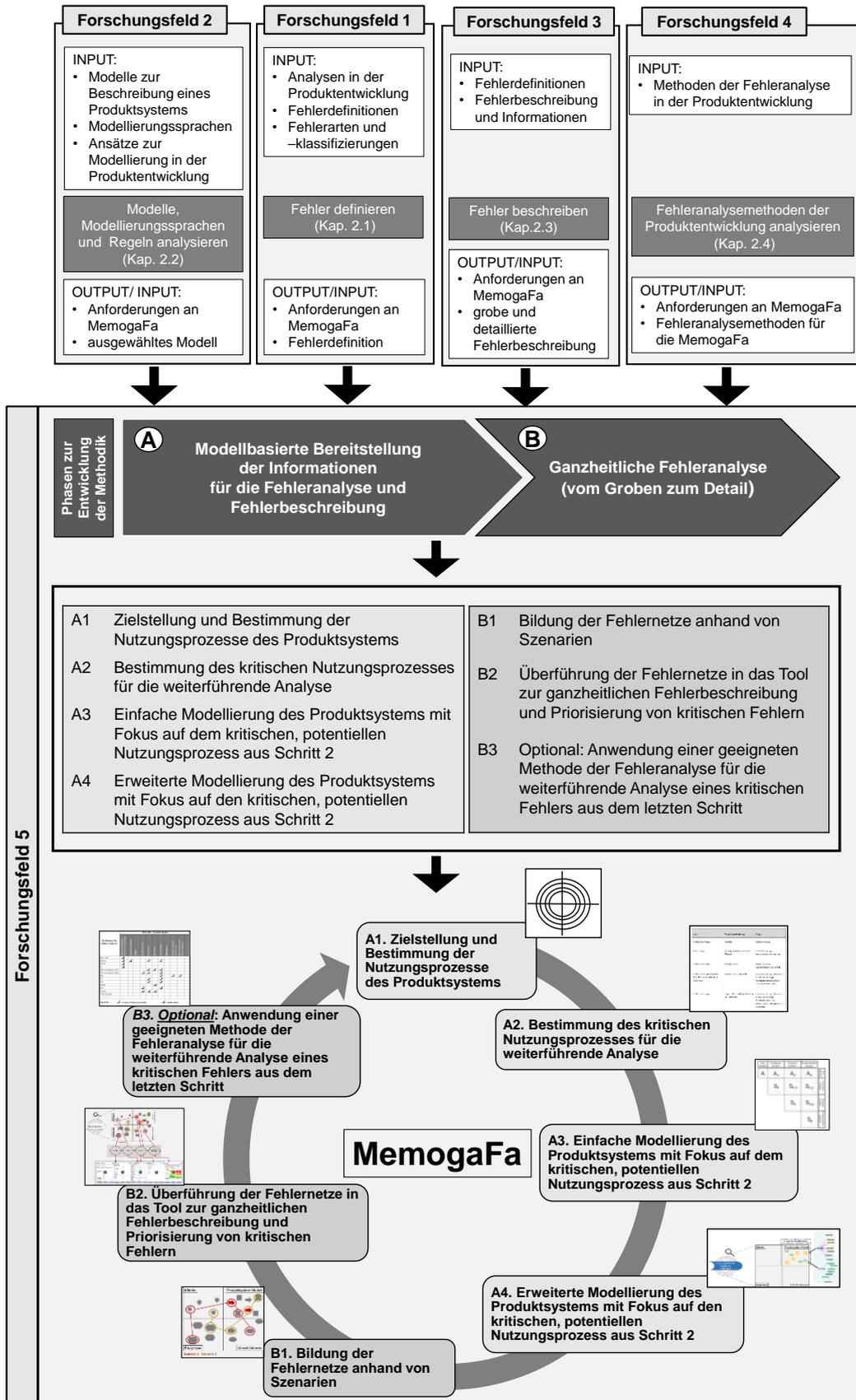


Abbildung 47: Darstellung der gesamten Entwicklung der modellbasierten und ganzheitlichen Methodik der Fehleranalyse (MemogaFa) [Eigene Darstellung]

4 Anwendung der Methodik für eine modellbasierte und ganzheitliche Fehleranalyse

Die zuvor entwickelte MemogaFa wird nachfolgend an zwei Anwendungsbeispielen validiert: dem K-VEC Bus (siehe Kapitel 4.1) sowie dem Q-ELF Linearantrieb (Kapitel 4.2). Anschließend erfolgt in Kapitel 4.3 eine Überprüfung der Anforderungserfüllung anhand der an die Methodik gestellten Anforderungen.

4.1 Beispiel am Projekt K-VEC

Beim ersten Anwendungsbeispiel handelt es sich um ein abgeschlossenes, internationales Projekt mit dem Namen K-VEC (Key-Vehicle) [Sequoia 2019]. Ziel war es, einen Prototyp (Elektrobus) für eine emissionsfreie Mobilität im öffentlichen Nahverkehr zu entwickeln (siehe Abbildung 48).

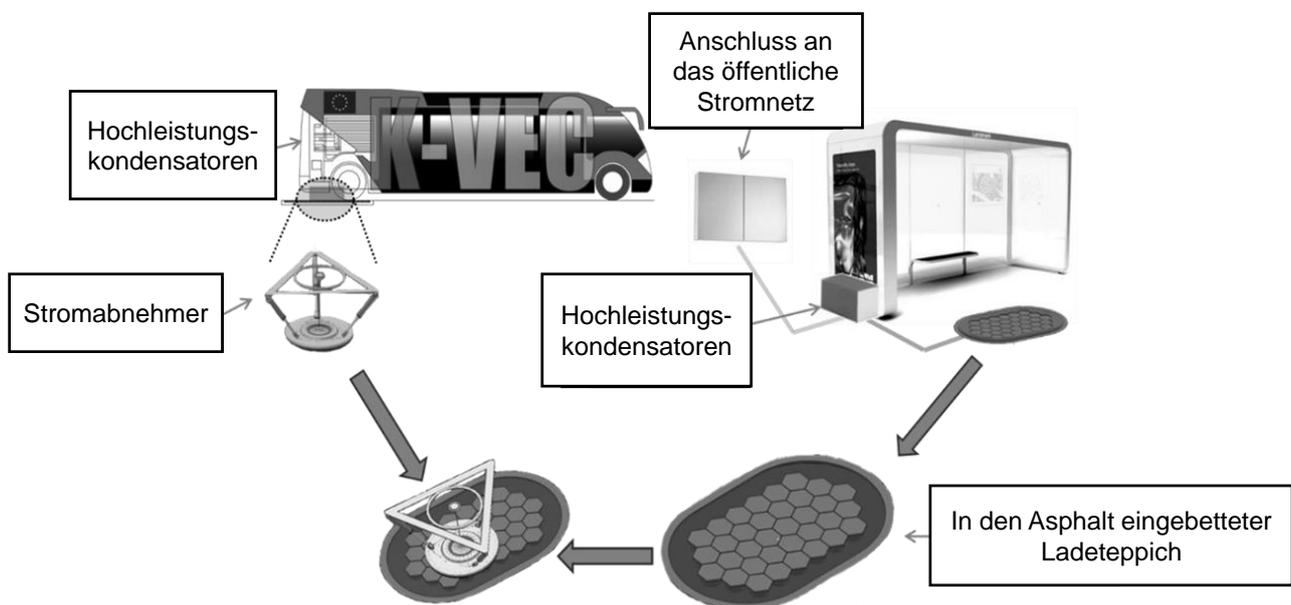
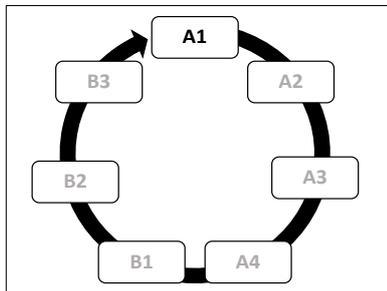


Abbildung 48: Prinzipdarstellung des K-VEC Systems [Sequoia 2019]

Um die „Emissionsfreiheit“ zu realisieren, soll ein Bus komplett elektrisch betrieben werden. Dabei fungieren ein Ultracap (Deutsch: Hochleistungskondensator oder Ultrakondensator) und eine Lithium-Ionen-Batterie als zentrale Energiequellen.

Hochleistungskondensatoren sind robuste Energiespeichermedien mit dem großen Vorteil gegenüber anderen Arten von Kondensatoren, dass sie in kurzer Zeit große Energiemengen schnell aufnehmen und bereitstellen. Dafür sollen sowohl im Bus als auch an der Haltestelle Hochleistungskondensatoren montiert werden, die einen Energietransfer innerhalb von ca. 5 Sekunden ermöglichen.

Das konduktive Ladeverfahren wird über einen Stromabnehmer realisiert, welcher am Boden des Busses installiert wird. Der Stromabnehmer besteht aus drei Antriebselementen und einer kreisförmigen Platte, die mit 145 kleinen „Probes“ (Deutsch: kleine elektrische „Prüfköpfe“) bestückt ist. An der Haltestelle soll der Bus zuerst über ein Kommunikationssystem erkannt und autorisiert werden. Der darauffolgende Energietransfer erfolgt durch einen Stromabnehmer, der sich mithilfe der Probes an den im Asphalt eingebetteten Ladeteppich andockt. Insbesondere beim Ladeprozess können viele potentielle Fehler entstehen, die im schlimmsten Fall zum Personenschaden führen können. Um diese potentiellen Fehler zu identifizieren, werden die sieben Schritte der MemogaFa am K-VEC System angewendet.



Im **ersten Schritt** soll die Zielstellung der MemogaFa festgelegt werden. Als Hilfestellung dafür sind zwei Fragen zu beantworten:

- (1) Welche grundfunktionale Hauptanforderung muss durch das zu entwickelnde Produkt (oder PS) erfüllt werden?
- (2) Welche potentiellen Fehler (ausgehend von PS) können zum Personenschaden führen?

Die grundfunktionale Hauptanforderung bezieht sich auf die Ebene des gesamten K-VEC Systems und lautet: „Der Bus muss Personen zum Ziel zuverlässig befördern“. Des Weiteren soll untersucht werden, welche potentiellen Fehler mit Personenschaden entstehen können. Für diese Untersuchung ist zunächst festzulegen, welche Nutzungsprozesse in der Nutzungsphase des K-VEC Systems vorhanden sind. Zu diesem Zweck wurde eine grobe Prozessanalyse in tabellarischer Form mit dem Fokus auf den Energietransfer erarbeitet (vgl. Tabelle 20).

Tabelle 20: Grobe Prozessanalyse des K-VEC Systems

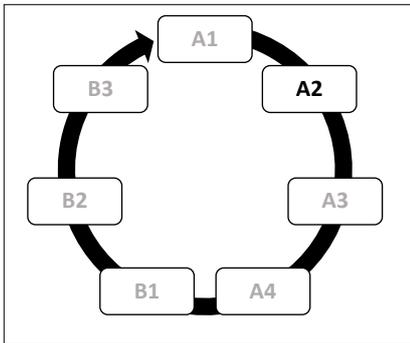
Input	Prozessbeschreibung	Output
Elektrische Energie	Bus fährt	Rotationsenergie
Elektrische Energie	Bus fährt bergab	Rotationsenergie Rückgewinnung von Energie
Bremsenergie	Bus bremst (Wiedergewinnung elektrischer Energie)	Elektrische Energie Rückgewinnung von Energie
Elektrische Energie	Eingebetteter Ladeteppich lädt an der Haltestelle	Elektrische Energie (Gespeichert in den Hochleistungskondensator an der Haltestelle)
Elektrische Energie (von dem Abschluss an das öffentliche Stromnetz)	Bus lädt an der Haltestelle	Elektrische Energie (Gespeichert in den Hochleistungskondensatoren und Lithium-Ionen-Batterien im Bus)

Methodik und Tool zur Umsetzung des ersten Schrittes der Methodik:

- Grobe Prozessanalyse der Nutzungsprozesse mit Prozessbeschreibung sowie In- und Outputs in tabellarischer Form

Ergebnisse:

- Zielstellung der Methodik: Fehleranalyse zur Identifizierung möglicher, potentieller Fehler, die zu Personenschaden und Nichterfüllung der Hauptanforderung („Der Bus muss Personen zum Ziel zuverlässig befördern“) führen können, und
- Tabelle mit fünf Nutzungsprozessen des K-VEC Systems.



Im **zweiten Schritt** der MemogaFa soll der kritische Nutzungsprozess auf Basis der groben Prozessanalyse präzisiert werden. Dafür werden die zwei im vorherigen Schritt formulierten Fragen als Hilfestellung herangezogen. Jedoch sollte für eine realistische Abschätzung in Bezug auf den kritischen Nutzungsprozess, ein Entwicklerteam befragt werden, das über das erforderliche Expertenwissen verfügt. Die Befragung wurde im Rahmen eines Workshops zum K-VEC Projekt durchgeführt.

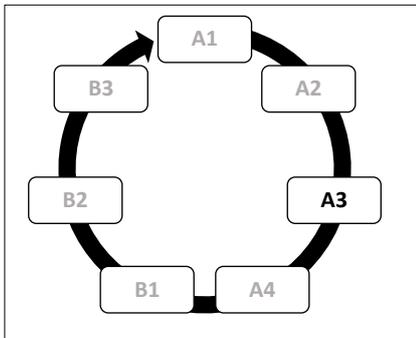
Resultierend aus den Befragungen und Ergebnissen ist der Nutzungsprozess „Bus lädt an der Haltestelle“ (Tabelle 20) der kritische Nutzungsprozess in der Nutzungsphase des K-VEC Systems. Infolge steht der Nutzungsprozess „Bus lädt an der Haltestelle“ im Untersuchungsfokus der MemogaFa.

Methodik und Tool zur Umsetzung des ersten Schrittes der Methodik:

- Befragungen des K-VEC Entwicklerteams und
- grobe Prozessanalyse der Nutzungsprozesse.

Ergebnisse:

- Identifikation des kritischen Nutzungsprozesses „Bus lädt an der Haltestelle“



Im **dritten Schritt** der MemogaFa wird das PS mit dem Fokus auf den Nutzungsprozess „Bus lädt an der Haltestelle“ modelliert. Dafür wird der DeCoDe-Ansatz mit LOOME0 als Werkzeug für die Umsetzung der Modellierung genutzt. Die Modellierung beginnt mit der Festlegung der Systemgrenze. Diese wird in Abhängigkeit zum fokussierten Nutzungsprozess („Bus lädt an der Haltestelle“) definiert.

Die Systemgrenze des technischen K-VEC Systems wird in Abbildung 49 vorgestellt.

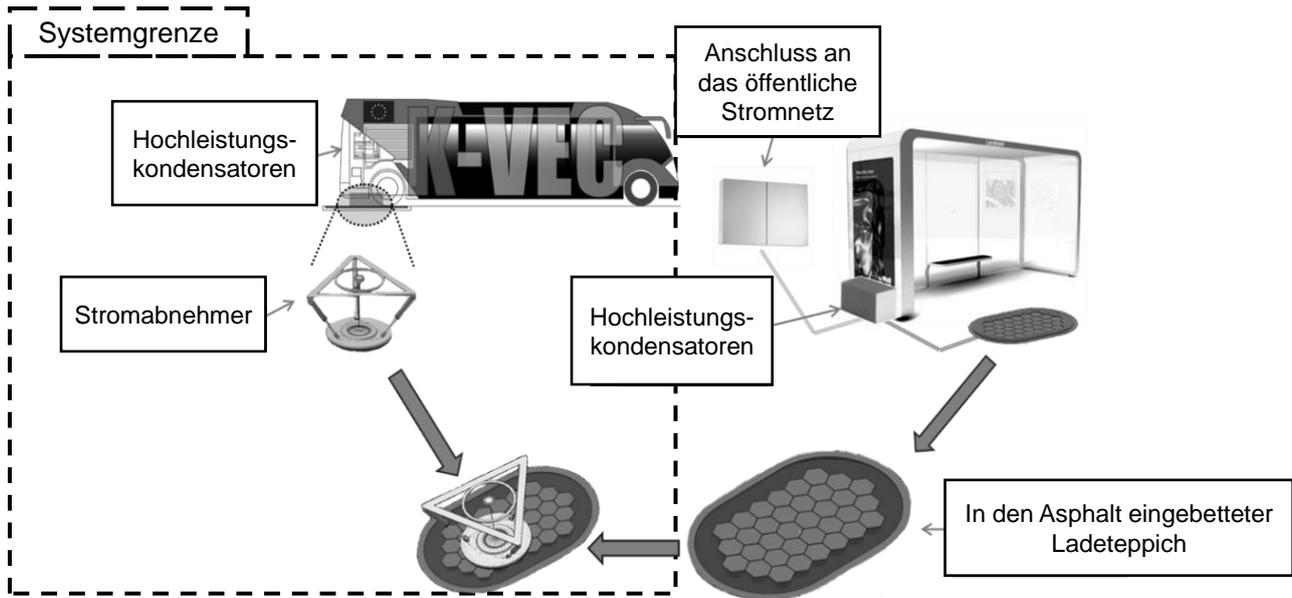


Abbildung 49: Systemgrenze des K-VEC Systems Abhängig von dem Nutzungsprozess "Bus lädt an der Haltestelle" [Sequoia 2019]

Nach Festlegung der Systemgrenze können verfügbare Daten und Informationen über die Systemelemente und Relationen innerhalb der Systemgrenze gezielt beschafft werden. Für eine zielgerichtete Beschaffung von Daten- und Informationen kann Tabelle 16 genutzt werden.

Weitere Informationen über das K-VEC System lassen sich aus den Pflichtenheften, Skizzen, CAD sowie Explosionszeichnungen extrahieren. Zusätzlich erfolgten Befragungen von Experten in Rahmen verschiedener Workshops, um die Richtigkeit und Konsistenz des modellierten Produktsystemmodells (PSM) zu prüfen. Da der Prototyp vom K-VEC System (Bus und Ladeteppich) zum Zeitpunkt der Modellierung physisch vorhanden war, beginnt die Modellierung gemäß der zweiten Vorgehensweise in der Modellierung (vgl. Kapitel 3.1.1). Deshalb wird zunächst die physikalische Domäne oder die Komponentenhierarchie erstellt. Dafür werden u. a. die Explosionszeichnungen des Entwicklerteams genutzt. Nach den Regeln der Modellierung (vgl. Kapitel 2.2.4) werden die entsprechenden Notationen sowie Ordnungsbeziehungen und Ontologie angewendet. Bspw. bedeutet die Notation (Beschreibung) der Relationen zwischen den Komponenten „Bestandteil von“ (vgl. Abbildung 50).

Zudem wird die Symbolik aus Tabelle 7 (z. B. Rechteck für Komponente) genutzt, um die Systemelemente eindeutig zu identifizieren. Oben, links in Abbildung 50 ist die DeCoDe-Hauptmatrix zu sehen. Durch den schwarzen Punkt ist erkennbar, um welche Matrix es sich handelt. In diesem Fall steht die Komponenten-Komponenten Matrix im Fokus der Modellierung.

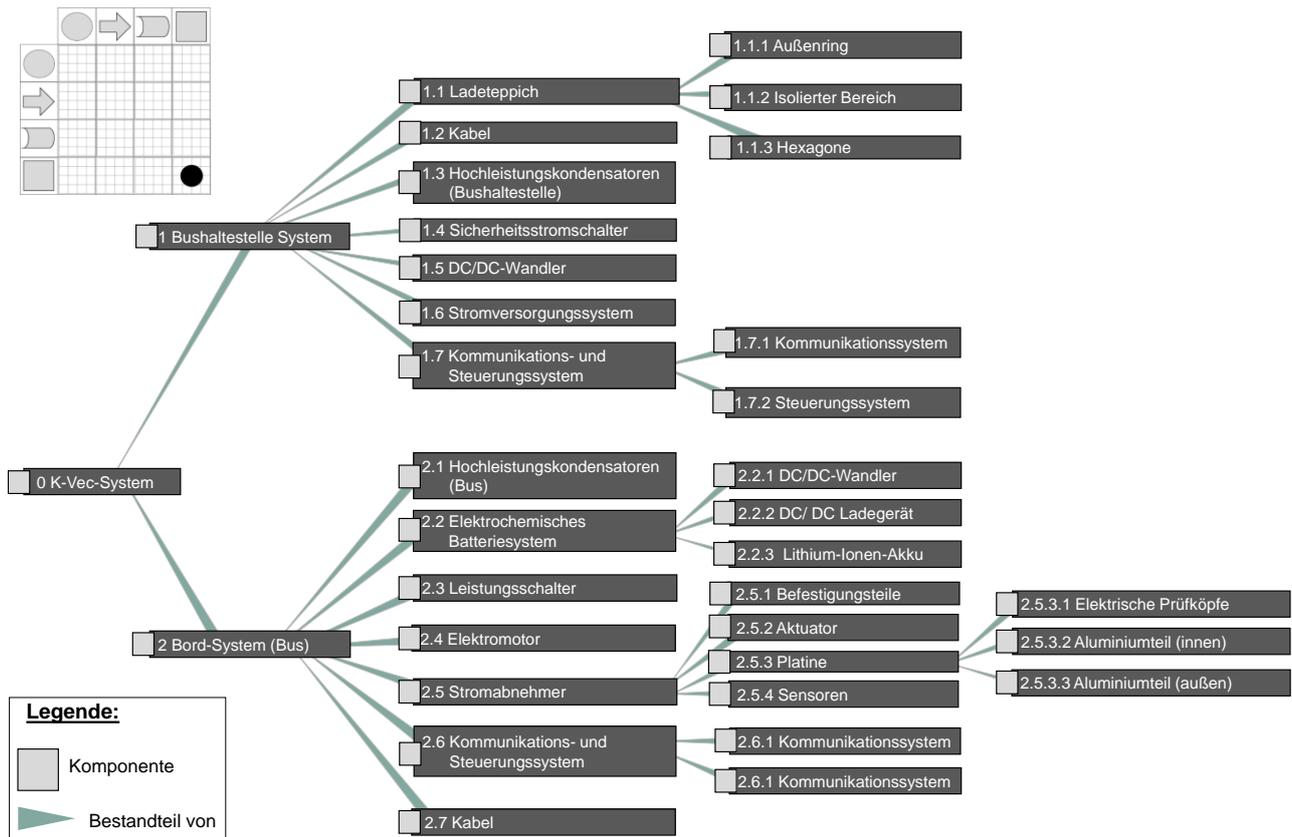


Abbildung 50: Komponenten-Hierarchie bzw. physikalische Struktur des K-VEC Systems

Aus den Komponenten wurden die Funktionen abgeleitet, die für den Nutzungsprozess "Bus lädt an der Haltestelle" relevant sind. Die Vernetzung zwischen den Funktionen und Komponenten, die den Nutzungsprozess realisieren, befindet sich im Anhang F. Nach der Vernetzung entsteht eine MDM mit drei Sichten (Funktionen, (Nutzungs-)Prozesse und Komponenten) auf das PSM.

Im MDM-Graphen aus Abbildung 51 wird mithilfe der Fokusoption auf den Nutzungsprozess „Bus lädt an der Haltestelle“ erkenntlich, welche Funktionen und Komponenten diesen Nutzungsprozess realisieren. Damit werden die Komponenten und Funktionen erfasst, die für die spätere Fehleranalyse relevant sind.

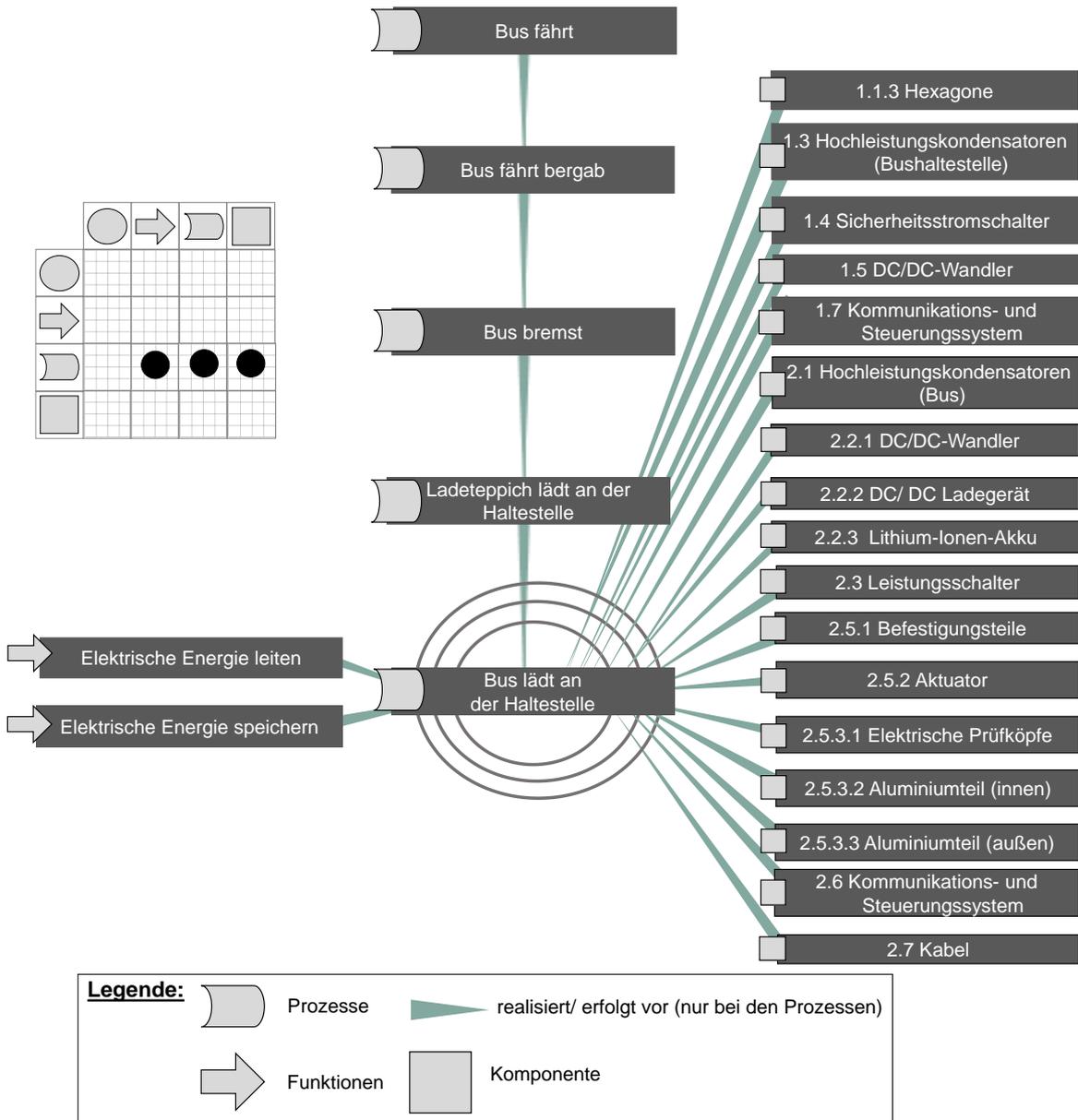


Abbildung 51: MDM mit Funktionen, Nutzungsprozessen und Komponenten mit Fokus auf den Nutzungsprozess "Bus lädt an der Haltestelle"

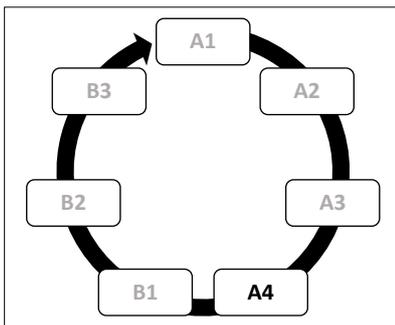
Aufbauend auf dem K-VEC Systemmodell mit Fokus auf den Nutzungsprozess „Bus lädt an der Haltestelle“ beginnt der nächste Schritt der MemogaFa – die erweiterte Modellierung.

Methodik und Tool zur Umsetzung des dritten Schrittes der Methodik:

- DeCoDe-Ansatz,
- DeCoDe-Hauptmatrix,
- Regeln der Modellierung und
- Software LOOME0 (als Tool zur Umsetzung der Modellierung).

Ergebnisse:

- Systemmodell bzw. Produktsystemmodell (PSM) (mit Fokus auf den Nutzungsprozess „Bus lädt an der Haltestelle“):
 - Anforderungen-Funktionen Matrix,
 - Prozesse-Komponenten Matrix für K-VEC (Teil-)System,
 - Prozesse-Funktionen Matrix für K-VEC (Teil-)System und
 - Prozesse-Komponenten-Funktionen-Matrix für K-VEC (Teil-)System.



Im **vierten Schritt** werden die Inhalte zu den vier Quadranten der Wechselwirkungen bestimmt. Wie im Kapitel 3.1.1 angeführt, bieten die Quadranten der Wechselwirkungen eine Plattform für eine ganzheitliche Fehleranalyse, da alle dafür notwendigen Faktoren (Komponenten, Funktionen, Umweltfaktoren, Effekte und Ereignisse) zur Verfügung stehen. Nachfolgend wird erläutert, wie die Daten und Informationen bezüglich des Nutzungsprozesses „Bus lädt an der Haltestelle“ für die Quadranten der Wechselwirkungen generiert werden können.

Die Komponenten und Funktionen, welche den kritischen Nutzungsprozess realisieren, wurden bereits im letzten Schritt der MemogaFa identifiziert. Diese werden in den oberen rechten Quadranten (PSM) überführt. Für die Identifizierung der Effekte, Umweltfaktoren und Ergebnisse werden unterschiedliche Quellen aus der Literatur als Vorlagen und Checklisten genutzt. Einige Beispiele dafür sind die Taxonomie von Grundursachen nach Krishna [Krishna 2008, S. 624] sowie die Listen zu den möglichen Effekten nach Feldhusen [Feldhusen et al. 2013, S. 375] und Lindemann/Ponn [Lindemann und Ponn 2011, S. 344 ff.].

Aus den Vorlagen und Checklisten wurden die Effekte, Ereignisse und Umweltfaktoren entnommen, die für den kritischen Nutzungsprozess relevant sind. Überdies wurden mithilfe von Expertenbefragungen Ereignisse und Umweltfaktoren identifiziert. Daraus ergeben sich die ausgefüllten Quadranten der Wechselwirkungen für den kritischen Nutzungsprozess „Bus lädt an der Haltestelle“ aus der Nutzungsphase des K-VEC Systems (vgl. Abbildung 52).

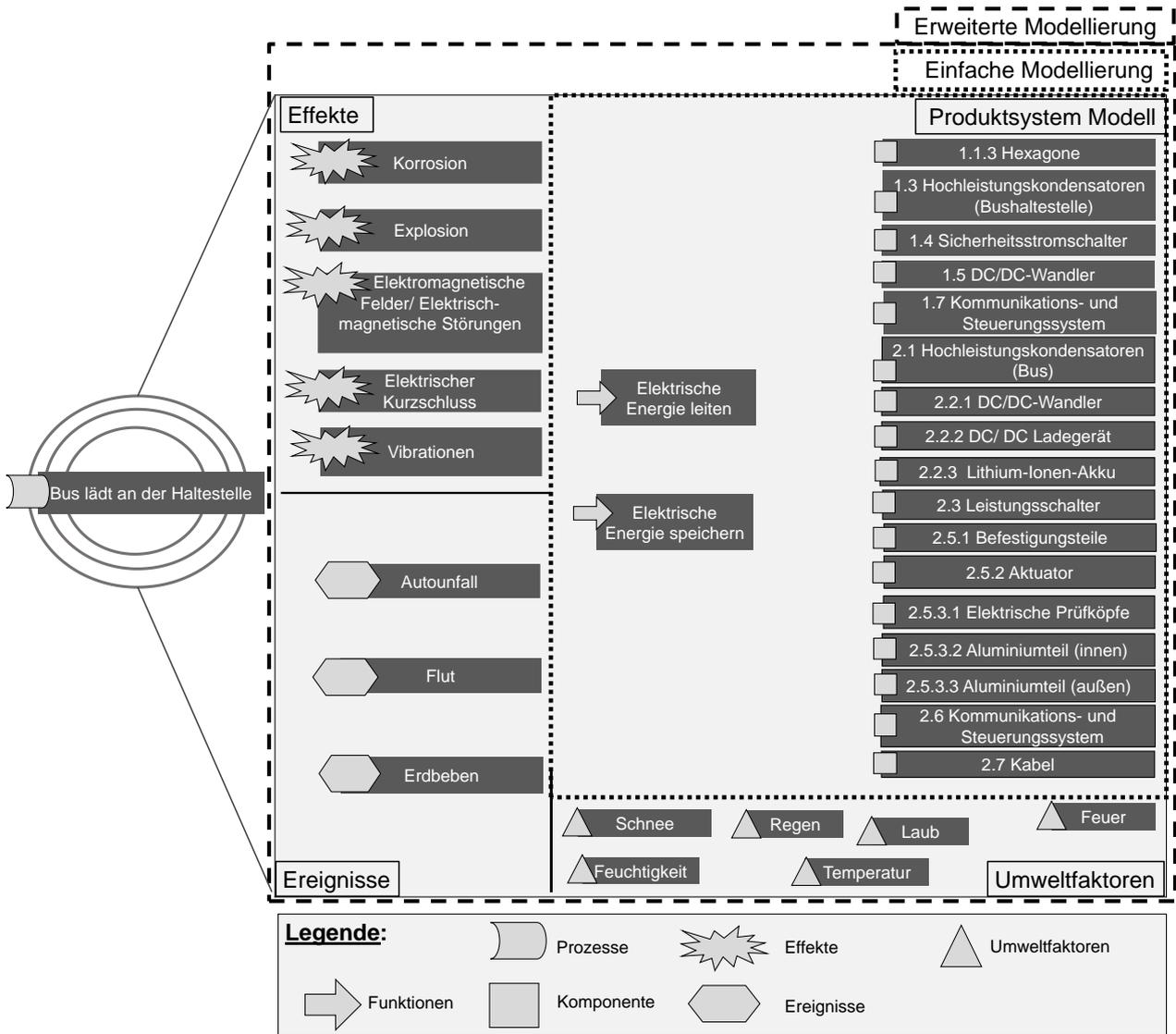


Abbildung 52: Ausgefüllte Quadranten der Wechselwirkungen mit dem Fokus auf den Nutzungsprozess "Bus lädt an der Haltestelle" [Eigene Darstellung]

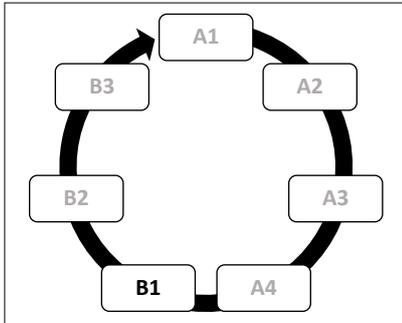
Bedingt durch die Vorgehensweise ist anzumerken, dass die Quadranten mit den Effekten und Ereignissen zu diesem Zeitpunkt nicht vollständig sind, da bei der Bildung von Fehlernetzen (im nächsten Schritt) weitere Effekte und Ereignisse aus den Wechselwirkungen und Ursachenkombinationen unterschiedlicher Faktoren entstehen können.

Methoden und Tool zur Umsetzung des vierten Schrittes der Methodik:

- Quadrant der Wechselwirkung mit Faktoren, die zu potentiellen Fehlern führen können und
- Expertenbefragung, hinsichtlich der Identifizierung von möglichen Effekten, Ereignissen und Umweltfaktoren.

Ergebnisse:

- Umweltfaktoren, Effekte, Ereignisse, Komponenten und Funktionen, die für den kritischen Nutzungsprozess „Bus lädt an der Haltestelle“ relevant sind, und
- **ausgefüllte** Quadranten der Wechselwirkungen.



Im **fünften Schritt** werden die Fehlernetze anhand der Szenarien gebildet. Die vier „Spannungsfelder“ des Quadranten liefern die ideale Basis, um daraus verschiedene Szenarien zu projizieren. Dabei repräsentiert jedes erstellte Szenario ein Fehlernetz. Idealerweise sollen bei der Identifikation von Fehlernetzen ein Entwicklerteam oder Experten dabei sein, die aufgrund ihrer Erfahrungen und technischen Wissens, Beziehungen und Wechselwirkungen

der Elemente aus den Quadranten im Detail erkennen können.

Zur besseren Übersicht wird in der Darstellung zu den Quadranten der Wechselwirkungen nur ein Szenario mit einem Fehlernetz gezeigt (vgl. Abbildung 53). Zwei weitere Szenarien befinden sich im Anhang F.

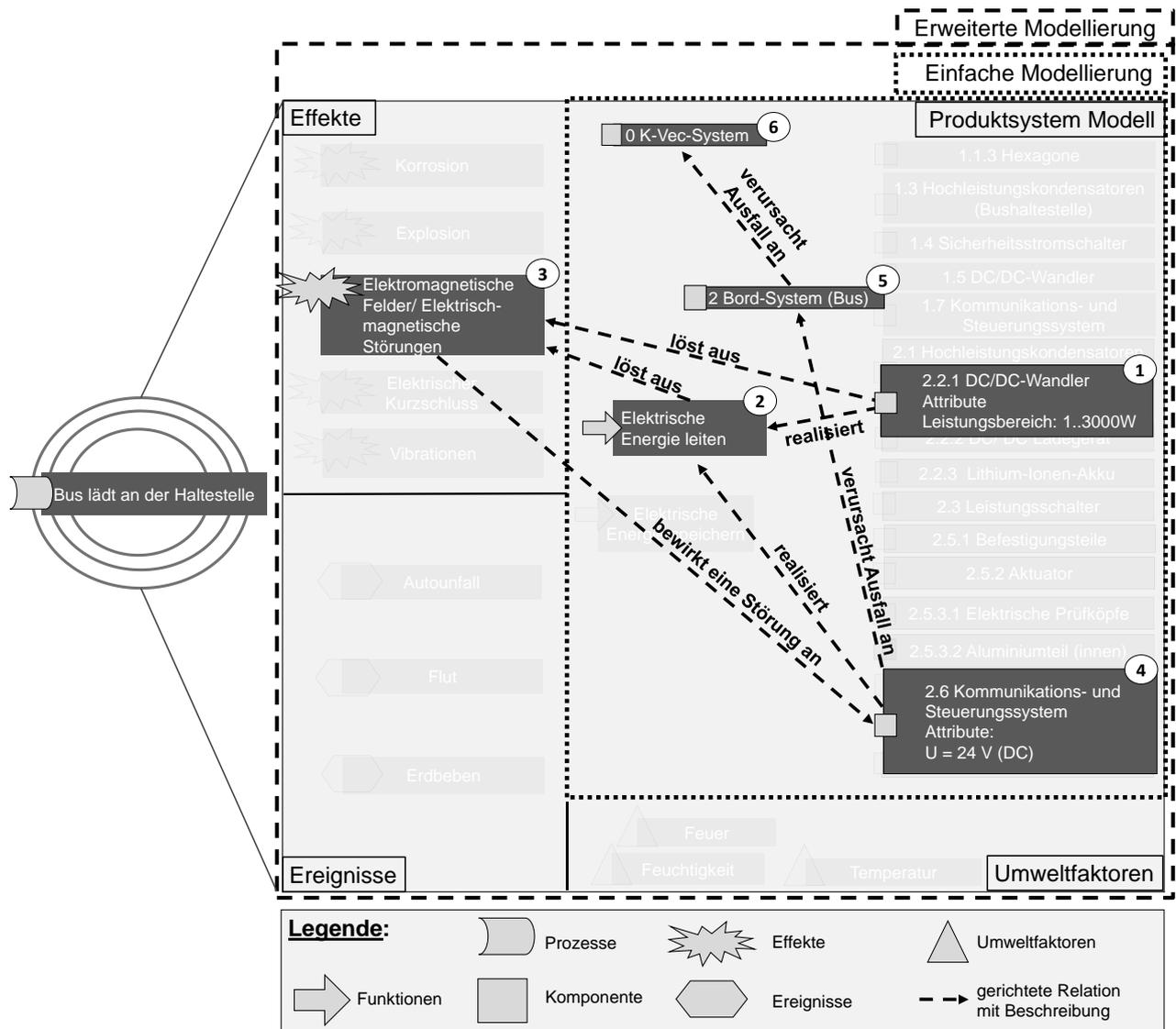


Abbildung 53: Potentielles Fehlernetz (oder Szenario) „Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)“ [Eigene Darstellung]

Bei dem Szenario in Abbildung 53 stehen die elektromagnetischen Felder, als physikalischer Effekt, und die damit verbundenen, elektromagnetischen Störungen im Mittelpunkt. Zum besseren Verständnis in Bezug auf die **zeitliche Reihenfolge des Fehlernetzes** werden die einzelnen Elemente der Fehlerkette nummeriert (von der Fehlerursache (**Startpunkt 1**) bis hin zur Fehlerauswirkung (**Endpunkt 6**)). Die Fehlerursache wird durch die leistungsstarke Komponente DC/DC Wandler (2.2.1) hervorgerufen. Bekanntlich ist die elektrische Leitung (P) das Produkt aus der Spannung (U) und dem Strom (I). Infolge entsteht bei einem hohen elektrischen Strom ein elektromagnetisches Feld.

Dieses Feld wird im Zusammenhang mit der elektromagnetischen Verträglichkeit auch als Quelle für eine elektromagnetische Störung bezeichnet (vgl. das Interferenzmodell von [Gonschorek et al. 2009]). Die elektromagnetische Störung wirkt sich negativ auf das sogenannte „interference victim“

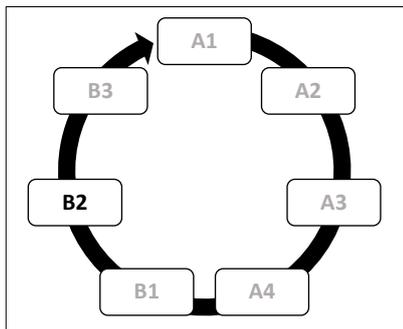
aus [Gonschorek et al. 2009]. Das sind technische Geräte, die anfällig auf elektromagnetische Felder reagieren. Das „interference victim“ in diesem Fall ist das Kommunikationssystem des K-VEC Systems. Folgend kann beim Ausfall des Kommunikationssystems, die Funktion „Energietransfer“ nicht realisiert werden, da der Bus nicht erkannt wird und somit nicht autorisiert werden kann. Dieser potentielle Fehler bewirkt einen vollständigen Ausfall des Nutzungsprozesses „Bus lädt an der Haltestelle“. Somit wäre die Hauptanforderung „Der Bus muss Personen zum Ziel zuverlässig befördern“ nicht erfüllt.

Methodik und Tool zur Umsetzung des fünften Schrittes der Methodik:

- Expertenbefragung und
- Szenarien in den Quadranten der Wechselwirkungen, die zur Bildung unterschiedlicher Fehler-netze mit potentiellen Fehlern verwendet werden.

Ergebnisse:

- **Chaotische unstrukturierte Fehlernetze**, die EMV bewirken und
- **grobe Beschreibung** von potentiellen Fehlerursachen und -auswirkungen.



Das identifizierte Fehlernetz zum Szenario EMV ist, bedingt durch die strukturelle Gestaltung der Quadranten, „chaotisch“ und „unstrukturiert“ (vgl. Abbildung 53). Jedoch wurde für eine einheitliche und strukturierte Fehlerbeschreibung das Tool zur Fehlerbeschreibung entwickelt (vgl. Kapitel 3.1.2). Im **sechsten Schritt** wird dieses Tool genutzt, um identifizierte Fehlernetze zu strukturieren. Die Strukturierung des Fehlernetzes ergibt sich durch die Überführung

dieser groben Fehlerbeschreibung über die Schablone für die ganzheitliche Fehlerdefinition, die vier Bestandteile beinhaltet:

- **Ursache,**
- **Effekt,**
- **Wirkung und**
- **Auswirkung oder Folge** (vgl. [Westkämper 1997; Zingel 2013]).

Der **Weg der Fehleranalyse vom Groben (ganzheitliche Fehleranalyse in den Quadranten der Wechselwirkungen) zum Detail (ganzheitliche Fehlerbeschreibung mittels des Excel- bzw. VBA-basierten Tools)** wird in Abbildung 54 skizziert. Die **Fehleranalyse** in den Quadranten der Wechselwirkungen ermöglicht eine **ganzheitliche Betrachtung** von potentiellen Fehlern in Wechselwirkungen und Kombinationen, während durch **das Tool** eine strukturierte, umfassende und **ganzheitliche Fehlerbeschreibung** realisiert wird.

Das Fehlernetz zum Szenario „EMV“ wird anhand der „Schablone“ für die ganzheitliche Fehlerdefinition in das Tool überführt. Dabei setzt sich das Fehlernetz wie folgt zusammen:

- **Ursache(n):** Funktion „Elektrische Energie leiten (DC)“ und Komponente „2.2.1 DC/DC Wandler“,
- **Effekt:** Elektrisch-magnetische Störungen,
- **Wirkung:** Störung der Komponente 2.6 Kommunikations- und Steuerungssystem,
- **Auswirkung oder Folge:** Ausfall der Hauptfunktion „Energietransfer“, weil der Bus nicht erkannt wird. Dadurch fällt auch das gesamte K-VEC System aus, da die Hochleistungskondensatoren im Bus nicht mehr aufgeladen werden können. Demnach ist die definierte Hauptanforderung aus dem Schritt 1 „Der Bus muss Personen zum Ziel zuverlässig befördern“ nicht erfüllt!

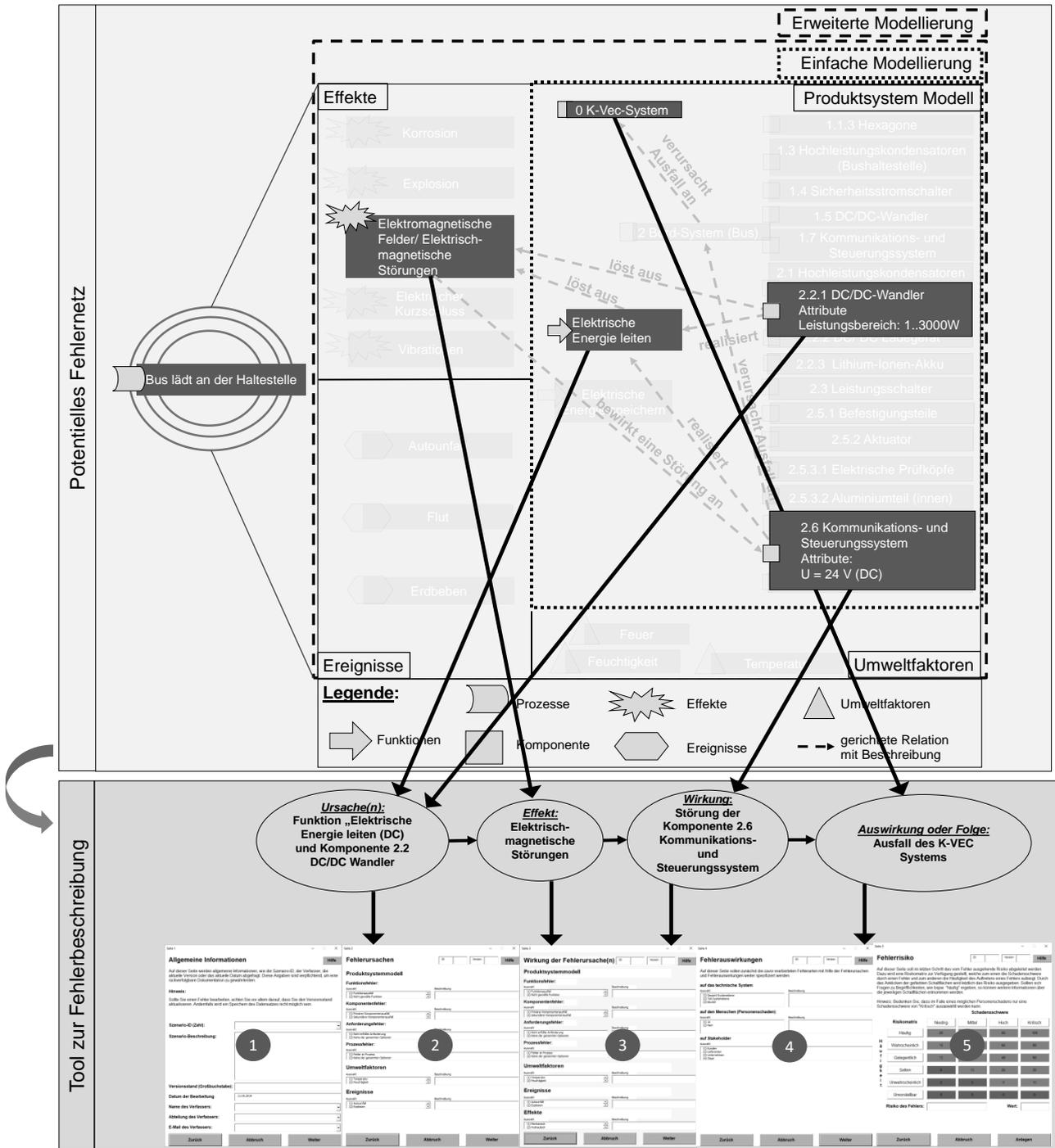


Abbildung 54: Überführung des Fehlernetzes „EMV“ in das Tool zur Fehlerbeschreibung [Eigene Darstellung]

In der Abbildung 55 sind Ausschnitte aus dem Tool zu sehen (vgl. auch Anhang G). Anhand der fünf Bereiche werden die Szenarien umfassend und detailliert beschrieben, denn das Tool bietet unterschiedliche Auswahl- und Beschreibungsmöglichkeiten (vgl. Kapitel 3.1.2).

1 Allgemeine Informationen		Allgemeine Informationen		
Szenario-ID	Szenario Beschreibung	Versionsstand	Datum der Bearbeitung	Name des Verfassers
1	EMV	C	19.06.2019	Musterman
2	Schnee auf dem Ladeteppich	A	04.09.2019	Musterman
3	Regenwasser fließt in die Hexagons des Ladeteppichs	B	04.09.2019	Musterman

2 Fehlerursachen		Fehlerursachen			
Funktionsfehler (FF)		Komponentenfehler (KF)		Umweltfaktoren	
Auswahl_FF	Beschreibung_FF	Auswahl_KF	Beschreibung_KF	Auswahl_UF	Beschreibung_UF
(1) Funktionsausfall (4) Keine der genannten Optionen	Geforderte Funktion: "Elektrische Energie leiten"	(5) Keine der genannten Optionen	Komponente "2.2 DC/DC Wandler" verursacht ein elektromagnetisches Feld	(4) Sonstige	Schnee
				(4) Sonstige	Regen

3 Wirkung der Fehlerursachen		Wirkung der Fehlerursache(n)			
Funktionsfehler (FF)		Komponentenfehler (KF)		Effekte	
Auswahl_FF	Beschreibung_FF	Auswahl_KF	Beschreibung_KF	Auswahl_EF	Beschreibung_EF
				(3) Elektrisch	Elektrisch-magnetische Störungen
(1) Funktionsausfall	"Elektrische Energie speichern"	(4) Kaskadierender Komponentenausfall	1.1.3 Hexagon; 2.1 Hochleistungskondensatoren (Bus); 2.5.3.1 Elektrische Prüfköpfe		
(1) Funktionsausfall	"Elektrische Energie leiten"	(4) Kaskadierender Komponentenausfall	1.1.3 Hexagone 2.5.3.1 Elektrische Prüfköpfe	(3) Elektrisch	Elektrischer Kurzschluss

4 Fehlerauswirkung		Fehlerauswirkungen			
auf das technische System		auf den Menschen (Personenschaden)		auf Stakeholder (S)	
Auswahl_TS	Beschreibung_TS	Auswahl_M	Beschreibung_M	Auswahl_S	Beschreibung_S
(1) Gesamt-Systemebene (2) Teil-Systemebene	(1) Folge auf der Gesamt-Systemebene: Ausfall der Hauptfunktion „Energietransfer“. Folge auf (2) Teil-Systemebenen: Störung der Komponente 2.6 Kommunikations- und Steuerungssystem durch EMV.	(2) Nein		(1) Kunden (3) Unternehmen	(1) Unzufriedene Kunden und (3) Imageschaden des Unternehmens
(1) Gesamt-Systemebene	0. K-VEC System	(2) Nein		(1) Kunden (3) Unternehmen	
(1) Gesamt-Systemebene	0. K-VEC System	(2) Nein		(1) Kunden (3) Unternehmen	

5 Risiko des Fehlers	
Risiko	Wert
Nicht tolerierbar	64
Unerwünscht	48
Unerwünscht	48

Abbildung 55: Auszüge aus dem Fehlerbeschreibungstool, detaillierte Beschreibung der Fehlernetze zu drei erarbeiteten Szenarien für das K-VEC System im Tool der Fehlerbeschreibung [Eigene Darstellung]

Ein zentraler Bestandteil des Tools ist die Risikomatrix zur Bewertung des Risikos eines potentiellen Fehlers in Abhängigkeit von der Häufigkeit der Eintrittswahrscheinlichkeit und der Schadenschwere.

Für das vorgestellte EMV-Szenario ergibt sich, aufgrund der hohen Häufigkeit des Auftretens, der Wert 64. Hierbei handelt es sich um ein nicht tolerierbares (Fehler-)Risiko (vgl. Abbildung 55), das durch entsprechende Maßnahmen vermindert oder eliminiert werden sollen. Da aber die Ableitung von Maßnahmen nicht zum Ziel der Methodik gehört, endet die MemogaFa an dieser Stelle. Außerdem ist **eine weitere Untersuchung mithilfe des siebten Schrittes der Methodik nicht mehr notwendig**, da **der potentielle Fehler vollständig identifiziert und beschrieben** worden ist.

Auf Basis der gespeicherten Daten und Informationen zu der Nutzungsphase des K-VEC Systems kann die MemogaFa für eine weiterführende Fehleranalyse bei Bedarf genutzt werden.

Methoden und Tool zur Umsetzung des sechsten Schrittes der Methodik:

- Quadranten der Wechselwirkungen und
- Tool der ganzheitlichen Fehlerbeschreibung.

Ergebnisse:

- **Strukturierte, einheitliche Beschreibung aller erarbeiteten Fehlernetze,**
- **detaillierte Beschreibung der Fehlernetze** mit Ursachen, Effekten, Wirkungen und Auswirkungen oder Folgen im Tool der Fehlerbeschreibung,
- **Lokalisierung des Fehlers und Identifikation betroffener Komponenten** und
- **Dokumentation** (Fehlerliste).

4.2 Beispiel am DFG-Projekt Q-ELF

Beim zweiten Beispiel handelt es sich um einen Linearantrieb aus dem abgeschlossenen DFG-Projekt Q-ELF („Qualitätsorientierter Methodenworkflow für die PE eines Linearantriebs in der Förder-technik“) [Wörner et al. 2014]. Das Ziel des Projektes war es, im Rahmen der Entwicklung und Auslegung eines Linearantriebs für intralogistische Anlagen¹¹ sicherzustellen, dass Qualitäts- und Zuverlässigkeitsanforderungen (wie bspw. die Funktionsfähigkeit) erfüllt werden. Dazu gehörte auch die Identifikation störender Einflüsse, die sich negativ auf das System „Linearantrieb“ auswirken können.

Der Linearantrieb funktioniert nach dem Prinzip der Linearmaschinen, die elektrische Energie in translatorische Bewegungsenergie umwandeln [Riekhof et al. 2012]. Das Funktionsprinzip des Linearantriebs bzw. Linearmaschine ist ähnlich wie bei den rotierenden Maschinen, wie in Abbildung 56 skizziert.

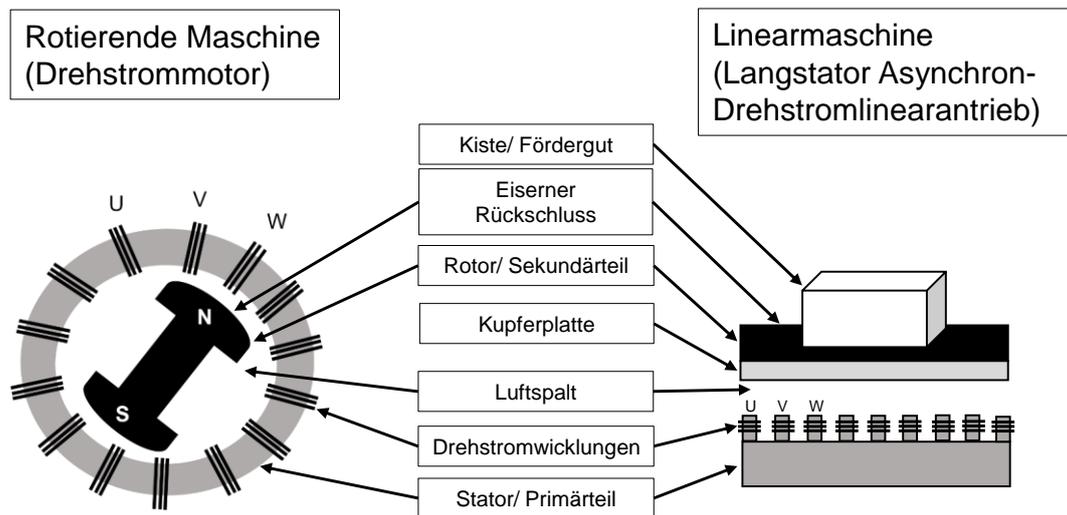


Abbildung 56: Funktionsprinzip der Linearmaschine (Langstator Asynchron-Drehstromlinearantrieb) im Vergleich zu der rotierenden Maschine [in Anlehnung an Wörner 2013]

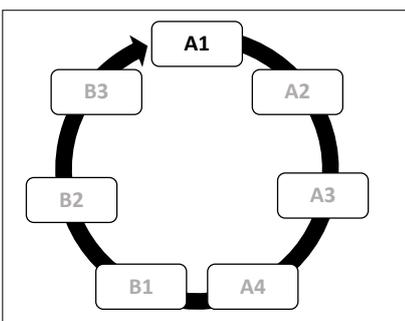
Beide Maschinen beinhalten einen Primär- und einen Sekundärteil. Dabei bestehen die rotierenden Maschinen aus einem Primärteil (Stator) mit einer Drehstromspule aus drei Wicklungen bzw. drei Phasen (L1, L2 und L3, im deutschen Raum wird oft der Index U, V und W verwendet). Die drei Wicklungen erzeugen drei magnetische Felder, welche um je 120° zueinander verschoben sind.

¹¹ Intralogistische Anlagen sind Anlagen, bei denen die „Planung, Einrichtung, Durchführung und Kontrolle innerbetrieblicher Materialflüsse in Fertigungs- und Handelsunternehmen sowie in öffentlichen Einrichtungen mittels fördertechnischer Systeme und unterstützender Informationssysteme“ erfolgt [Gabler Wirtschaftslexikon 2019].

Die elektromagnetischen Felder bewirken eine rotatorische Bewegung am Sekundärteil (auch Rotor genannt). Um Kontinuität zu gewährleisten, besteht dieses Sekundärteil aus einem Dauermagnet.

Im Vergleich dazu setzt sich der Sekundärteil einer Linearmaschine aus einer Kupferplatte und einem eisernen Rückschluss zusammen. Im Gegensatz zu den rotierenden Maschinen erzeugt das elektromagnetische Feld der Linearmaschine eine translatorische Bewegung. Die translatorische Bewegung entsteht durch eine Kraft, auch Lorentzkraft genannt, welche aus der Kombination von einem Magnetfeld und Wirbelströmen resultiert [Riekhof et al. 2012]. Da die Wicklungen nur bei einem der zwei Teile (in diesem Fall der Primärteil) vorhanden sind, wird der Linearantrieb als Asynchron-Drehstromlinearantrieb bezeichnet. Die Bezeichnung „Langstator“ ergibt sich, weil die Wicklungen an dem „längeren“ Teil (Primärteil) angebracht werden (vgl. Abbildung 56).

Nachfolgend wird die MemogaFa am technischen System „Langstator Asynchron-Drehstromlinearantrieb (DLA)“ angewendet.



Im **ersten Schritt** der MemogaFa wird die Zielstellung der Methodikanwendung anhand der zwei erarbeiteten Fragen bestimmt:

- (1) Welche grundfunktionale Hauptanforderung muss durch das zu entwickelnde Produkt (oder PS) erfüllt werden?
- (2) Welche potentiellen Fehler (ausgehend von PS) können zum Personenschaden führen?

Die grundfunktionale Hauptanforderung für den Linearantrieb ist wie folgt definiert: „Der Linearantrieb muss in der Lage sein, eine Masse von 50 kg über eine Steigung von 30° mit einer Geschwindigkeit von 2 m/s zu **fördern**“ [Riekhof et al. 2012].

Deshalb sollen mögliche Fehler analysiert werden, die in der Nutzungsphase zur Nichterfüllung der Hauptanforderung oder zum Personenschaden führen können.

Dafür ist es zunächst erforderlich, die Nutzungsprozesse aus der potentiellen Nutzungsphase grob zu bestimmen. Hierbei liegt der Fokus der Analyse der Nutzungsprozesse auf dem Energietransfer und dem Materialfluss (vgl. Tabelle 21).

Tabelle 21: Grobe Prozessanalyse des Q-ELF Systems für die potentiellen Nutzungsprozesse

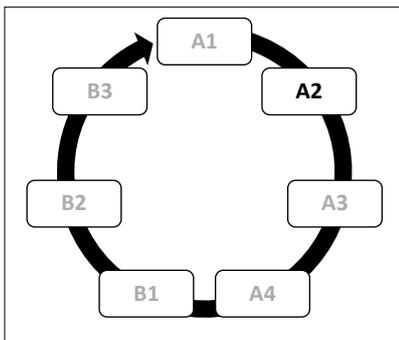
Input	Prozessbeschreibung	Output
Kiste/Fördergut	Beladen	Kiste/Fördergut auf dem eisernen Rückschluss
Elektrische Energie	Beschleunigen	Translatorische Energie Wärmeenergie (Verlustenergie) Wirbelströme (Verlustenergie)
Elektrische Energie	Konstant fördern	Translatorische Energie Wärmeenergie (Verlustenergie) Wirbelströme (Verlustenergie)
Elektrische Energie	Verzögern	Translatorische Energie Wärmeenergie (Verlustenergie) Wirbelströme (Verlustenergie)
Kiste/Fördergut auf dem eisernen Rückschluss	Entnahme	Kiste/Fördergut

Methodik und Tool zur Umsetzung des ersten Schrittes der Methodik:

- Grobe Prozessanalyse der potentiellen Nutzungsprozesse mit Prozessbeschreibung sowie In- und Outputs in tabellarischer Form

Ergebnisse:

- Zielstellung der Methodik: Fehleranalyse zur Identifizierung möglicher, potentieller Fehler die zu Personenschaden und Nichterfüllung der Hauptanforderung (Der Linearantrieb muss in der Lage sein, eine Masse von 50 kg über eine Steigung von 30° mit einer Geschwindigkeit von 2 m/s zu fördern) führen können, und
- Tabelle mit potentiellen Nutzungsprozessen des Systems „Langstator Asynchron-DLA“.



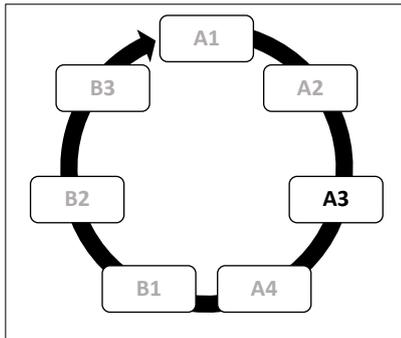
Nach Festlegung der Nutzungsprozesse, soll im **zweiten Schritt** der kritische, potentielle Nutzungsprozess bestimmt werden. In diesem Fall leitet sich der Nutzungsprozess aus der Hauptanforderung ab: „Der Linearantrieb muss in der Lage sein, eine Masse von 50kg über eine Steigung von 30° mit einer Geschwindigkeit von 2 m/s zu **fördern**“. Deshalb steht der kritische, potentielle Nutzungsprozess „Konstant **fördern**“ nachfolgend im Fokus der Methodik.

Methodik und Tool zur Umsetzung des ersten Schrittes der Methodik:

- Grobe Prozessanalyse der Nutzungsprozesse

Ergebnisse:

- Identifikation des kritischen, potentiellen Nutzungsprozesses „Konstant fördern“



Mit Blick auf den kritischen, potentiellen Nutzungsprozess „Konstant fördern“ erfolgt im **dritten Schritt** die einfache Modellierung bzw. die Modellierung des PS. Die Modellierung beginnt mit der Definition der Systemgrenze, welche in Abhängigkeit zum kritischen, potentiellen Nutzungsprozess „Konstant fördern“ festgelegt wird. Die Systemgrenze umfasst die komplette Strecke des Linearantriebes sowie das Fördergut.

Mithilfe einer gezielten Expertenbefragung und unterschiedlicher Dokumente (z. B. CAD Zeichnungen usw.) wird das Systemmodell bzw. das PSM erstellt. Dabei werden einzelne Hierarchien von Komponenten, Nutzungsprozesse und Funktionen nach den DeCoDe-Prinzipien (vgl. Abbildung 31) und den Regeln der Modellierung (vgl. Kapitel 2.2.4) erarbeitet. Die Darstellung einzelner Hierarchien befindet sich im Anhang F.

Die Hierarchien der jeweiligen Sichten werden dann miteinander vernetzt (z. B. Funktionen- mit der Komponentensicht). Die multidimensionale, graphische Darstellung aller Vernetzungen erfolgt in der MDM. Anhand der MDM kann transparent visualisiert werden, welche Funktionen und Komponenten den Nutzungsprozess „Konstant fördern“ realisieren und somit für die spätere Fehleranalyse relevant sind (siehe Abbildung 57). Diese Betrachtung ist insofern für die Fehleranalyse wichtig, weil potentielle Ausfälle von Funktionen und/oder Komponenten einen Ausfall des Nutzungsprozesses verursachen können, sodass die Hauptanforderung nicht erfüllt wird.

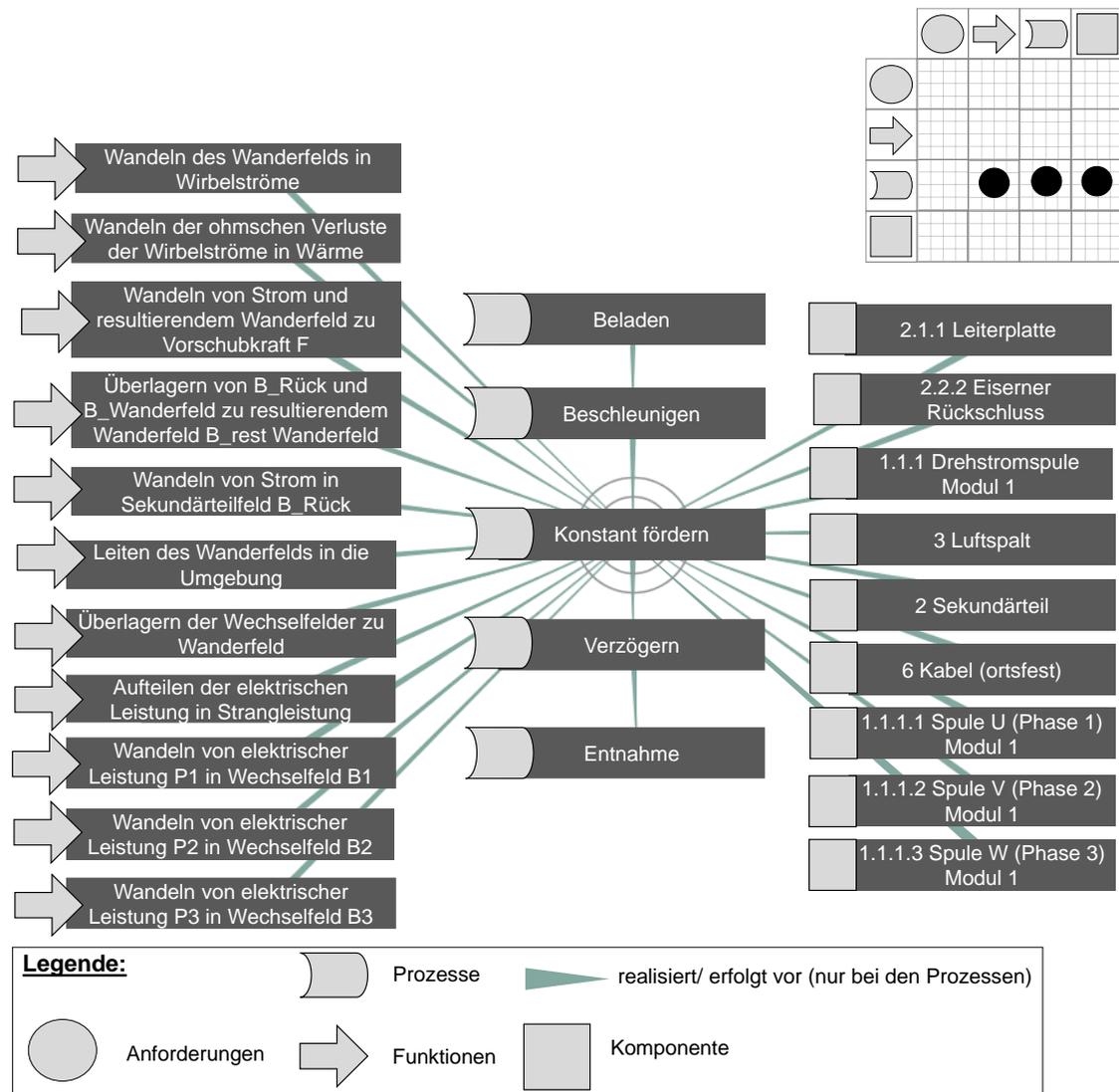


Abbildung 57: MDM mit Funktionen, Nutzungsprozessen und Komponenten mit dem Fokus auf den Nutzungsprozess "Konstant fördern"

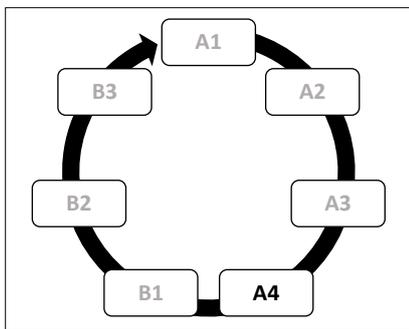
Die potentiellen Ausfälle können aber auch von „äußeren“ Faktoren verursacht werden, die ebenfalls in einer Wechselwirkung zum PSM stehen. Um diese Faktoren systematisch zu erfassen, dient der nächste Schritt der MemogaFa: Erweiterte Modellierung des Produktsystems mit Fokus auf dem kritischen, potentiellen Nutzungsprozess aus Schritt 2.

Methodik und Tool zur Umsetzung des dritten Schrittes der Methodik:

- DeCoDe-Ansatz,
- DeCoDe-Hauptmatrix,
- Regeln der Modellierung und
- Software LOOME0 (als Tool zur Umsetzung der Modellierung).

Ergebnisse:

- Systemmodell (mit dem Fokus auf den Nutzungsprozess „Konstant fördern“):
 - Anforderungen-Funktionen Matrix,
 - Komponenten-Komponenten/ Komponentenhierarchie Matrix für Q-ELF (Teil-)System,
 - Prozesse-Prozesse Matrix für Q-ELF (Teil-)System,
 - Funktionen-Funktionen Matrix für Q-ELF (Teil-)System,
 - Komponenten-Funktionen-Matrix für Q-ELF (Teil-)System und
 - Prozesse-Komponenten-Funktionen-Matrix für Q-ELF (Teil-)System.



Für die erweiterte Modellierung im **vierten Schritt** der MemogaFa wird das Tool mit den vier Quadranten der Wechselwirkungen eingesetzt. Dafür werden die Funktionen und Komponenten, die den Nutzungsprozess „Konstant fördern“ realisieren in die Quadranten des Produktsystemmodells (oben rechts) überführt. Analog zum vorherigen Anwendungsbeispiel werden einzelne Effekte, Ereignisse und Umweltfaktoren anhand von Checklisten aus der Literatur und Expertenwissen erfasst. Die identifizierten Effekte, Ereignisse und Umweltfaktoren, die einen direkten Einfluss auf den Nutzungsprozess („Konstant fördern“) haben, werden in Abbildung 58 präsentiert.

Die identifizierten Effekte, Ereignisse und Umweltfaktoren, die einen direkten Einfluss auf den Nutzungsprozess („Konstant fördern“) haben, werden in Abbildung 58 präsentiert.

Damit ist die „Plattform“ für den nächsten Schritt der MemogaFa (Bildung der Fehlernetze anhand von Szenarien) erstellt worden.

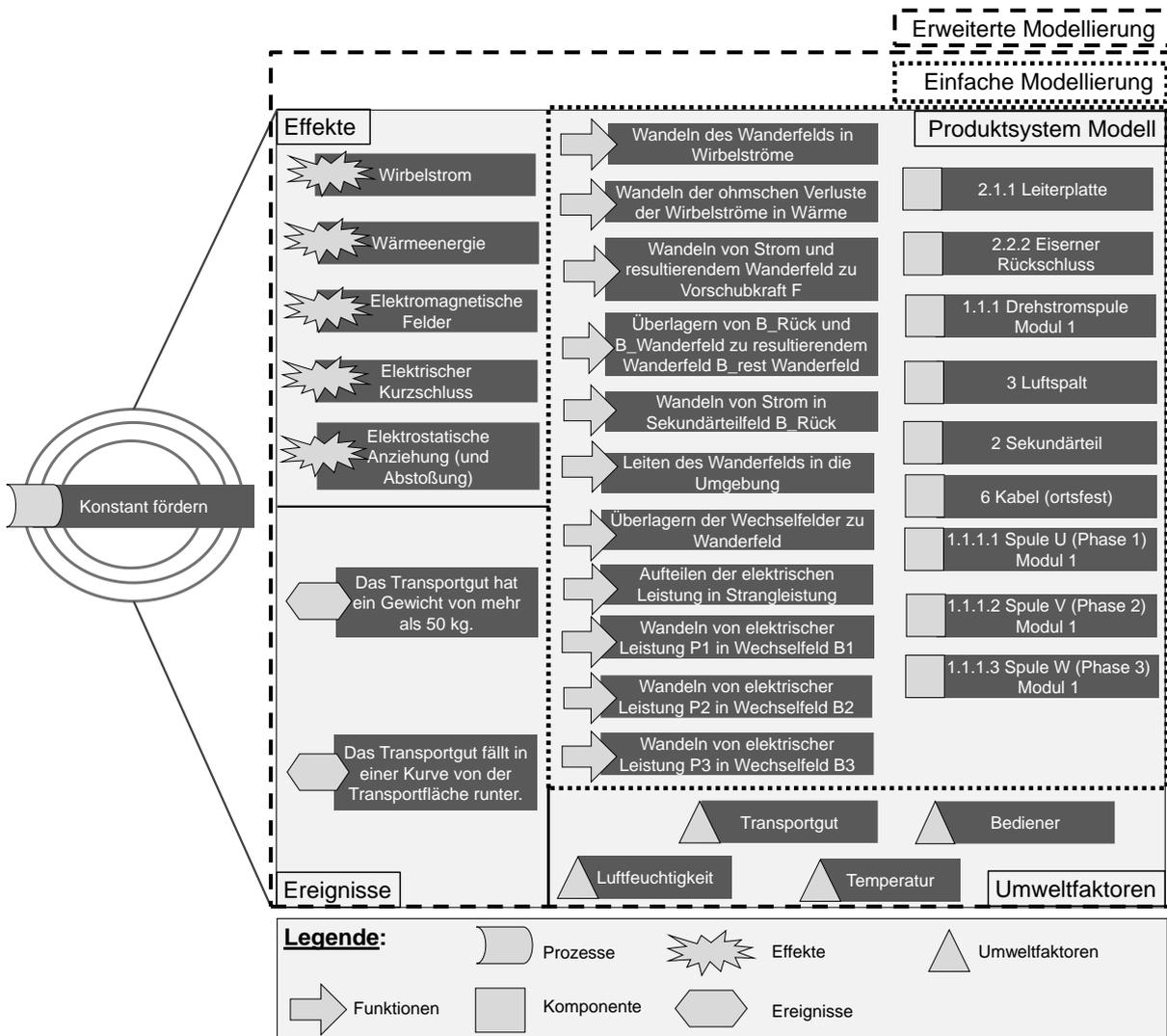


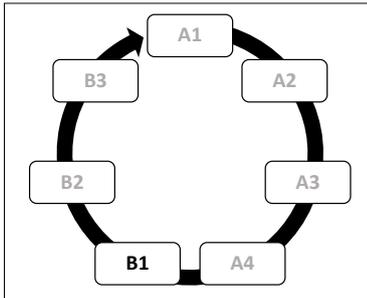
Abbildung 58: Ausgefüllte Quadranten der Wechselwirkungen mit dem Fokus auf den Nutzungsprozess "Konstant fördern" [Eigene Darstellung]

Methodik und Tool zur Umsetzung des vierten Schrittes der Methodik:

- Quadranten der Wechselwirkungen mit Faktoren, die zu potentiellen Fehlern führen können (**Neues Tool**) und
- Expertenbefragung, hinsichtlich der Identifizierung von möglichen Effekten, Ereignissen und Umweltsystemen.

Ergebnisse:

- Umweltsystemen, Effekte, Ereignisse, Komponenten und Funktionen, die für den kritischen Nutzungsprozess „Konstant fördern“ relevant sind, und
- **ausgefüllte Quadranten** der Wechselwirkungen.



Mit den vier Quadranten der Wechselwirkungen können im **fünften Schritt** der Methodik unterschiedliche Szenarien projiziert werden. Jedes Szenario bildet ein Fehlernetz, das aus Fehlerursache, Effekt, Fehlerwirkung und Fehlerauswirkung (oder -folge) besteht. Dabei werden Wechselwirkungen zwischen einzelnen Elementen aus den Quadranten sowie Kombinationen von Ursachen identifiziert. Insgesamt gibt es für dieses Anwendungsbeispiel drei Szenarien (vgl. Anhang F).

Wobei eines der erarbeiteten Szenarien einen direkten Bezug zur Förderdauer und somit zur Hauptanforderung hat. Deshalb wird dieses Szenario in der Abbildung 59 vorgestellt. Die **Nummerierung** der Elemente aus einem Fehlernetz verdeutlicht die **zeitliche Abfolge**, beginnend mit der **Fehlerursache (1)** bis zu der **Fehlerauswirkung (6)** (vgl. Abbildung 59).

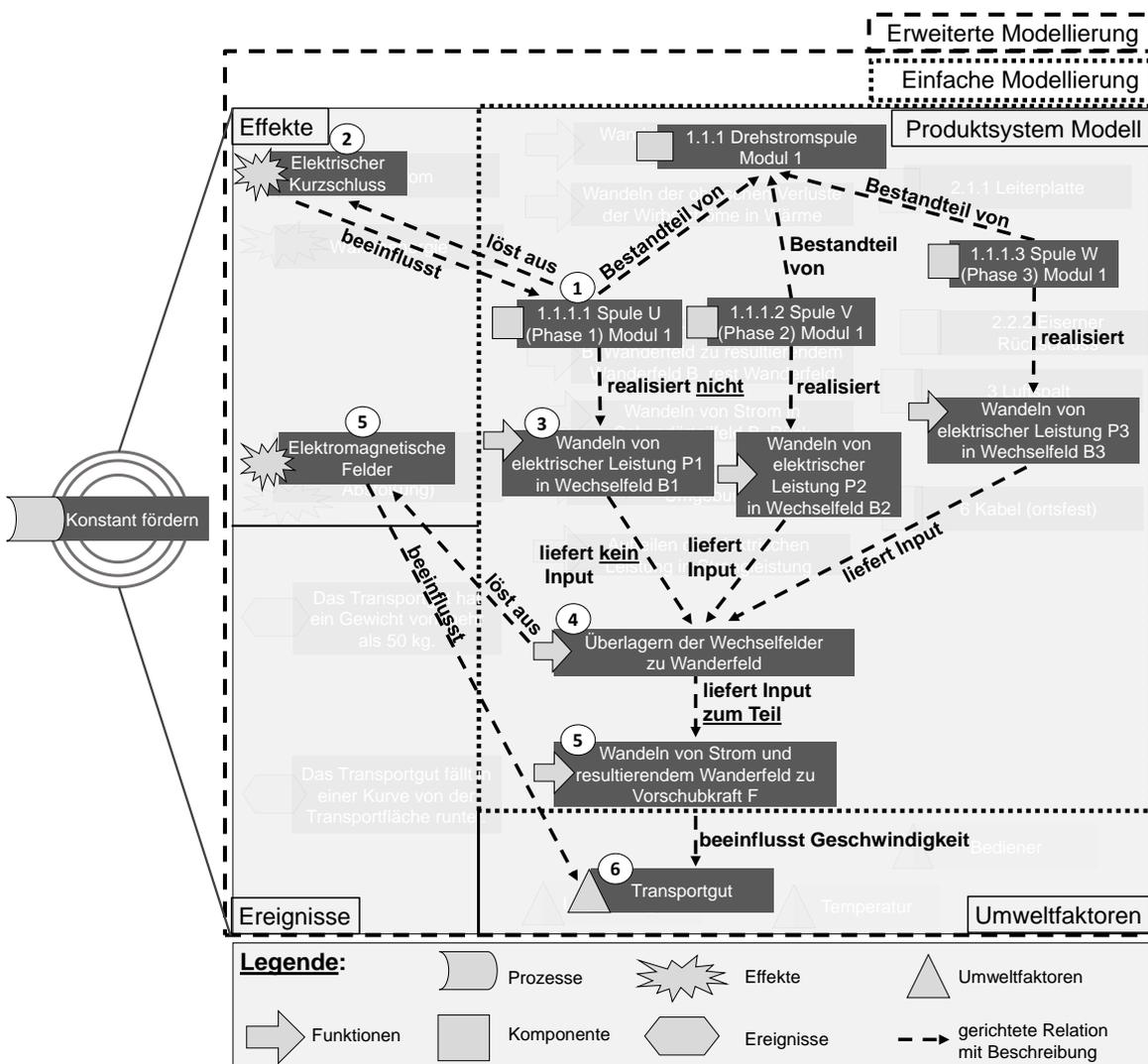


Abbildung 59: Potentielles Fehlernetz, Szenario „Elektrischer Kurzschluss“ im Q-ELF Systemmodell [Eigene Darstellung]

Das Szenario oder Fehlernetz in Abbildung 59 wird durch einen elektrischen Kurzschluss (Effekt) an der Spule U (Phase 1) aufgelöst. Dieser Effekt kann durch eine „schlechte“ Isolierung an der Spule verursacht werden. Aufgrund des Ausfalls der Spule U (Komponenten 1.1.1.1) wird die damit verbundene Funktion (Wandeln von elektrischer Leistung P1 in Wechselfeld B1) nicht realisiert. In Folge wird die Funktion „Überlagern der Wechselfelder zu Wanderfeld“ nur „zum Teil“ realisiert, weil das Wechselfeld der Spule U ausfällt.

Aus der Überlagerung der einzelnen Wechselfelder resultiert das Wanderfeld, das für die Vorschubkraft F verantwortlich ist. Aufgrund des Ausfalls eines Wechselfeldes wird die Funktion „Wandeln von Strom und resultierendem Wanderfeld zu Vorschubkraft F“ nur partiell realisiert. Dies führt zu einer geringeren Vorschubkraft und einer langsamen Fördergeschwindigkeit, sodass die geförderte Geschwindigkeit von 2 m/s nicht realisiert wird. Zusätzlich dazu ist der negative Einfluss der elektromagnetischen Felder auf das Transportgut zu berücksichtigen.

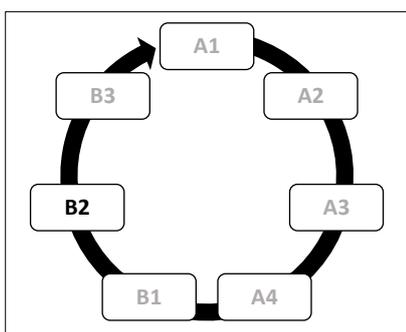
Diese „unstrukturierten“ Zusammenhänge sollen im nächsten Schritt anhand des Tools der ganzheitlichen Fehlerbeschreibung strukturiert und einheitlich beschrieben werden.

Methoden und Tool zur Umsetzung des fünften Schrittes der Methodik:

- Expertenbefragung und
- Szenarien in den Quadranten der Wechselwirkungen, die zur Bildung unterschiedlicher Fehlernetze mit potentiellen Fehlern verwendet werden (**Neues Tool**).

Ergebnisse:

- **Chaotische und unstrukturierte** Fehlernetze und
- **grobe Beschreibung** von potentiellen Fehlerursachen und -auswirkungen.



Das entwickelte Tool zur einheitlichen Fehlerbeschreibung kommt im **sechsten Schritt** zum Einsatz. Durch die Anwendung des Tools soll aus der unstrukturierten Struktur der Fehlernetze eine strukturierte und einheitliche Fehlerbeschreibung resultieren. Dabei erfolgt die Fehlerbeschreibung mithilfe der Schablone, welche auf der einheitlichen Fehlerdefinition basiert. Die einzelnen Glieder des Fehlernetzes werden über diese „angedachte“ Schablone

strukturiert und geordnet in das Tool überführt (vgl. Abbildung 60).

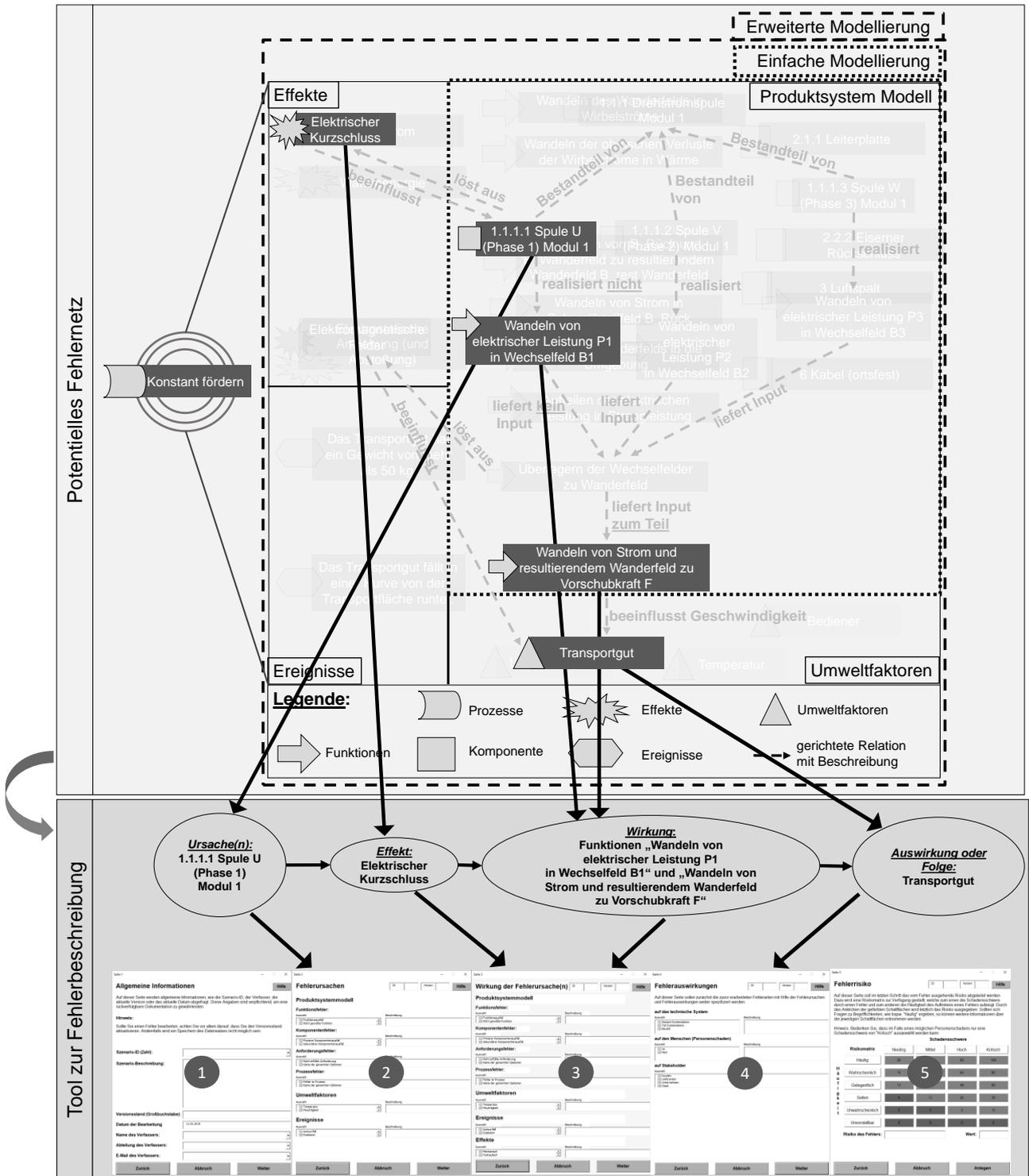


Abbildung 60: Überführung des Fehlernetzes „Elektrischer Kurzschluss“ in das Tool zur Fehlerbeschreibung [Eigene Darstellung]

Daraus ergibt sich folgende Zuordnung zwischen den Elementen aus den Quadranten der Wechselwirkungen und den vier Bestandteilen (Ursache, Effekt, Wirkung und Auswirkung oder Folge) der ganzheitlichen Fehlerbeschreibung:

- **Ursache(n):** 1.1.1.1 Spule U (Phase 1) Modul 1
- **Effekt:** Elektrischer Kurzschluss
- **Wirkung:** Funktionen „Wandeln von elektrischer Leistung P1 in Wechselfeld B1“ und „Wandeln von Strom und resultierendem Wanderfeld zu Vorschubkraft F“
- **Auswirkung oder Folge:** Transportgut wird langsam befördert (Hauptanforderung an die geförderte Geschwindigkeit von 2 m/s wird nicht erfüllt)

Durch das Tool zur Fehlerbeschreibung wird das Fehlernetz detailliert und strukturiert beschrieben. Die Ergebnisse aus dem Tool werden in Abbildung 61 vorgestellt (vgl. auch Anhang G). Somit ergibt sich aus den unstrukturierten und chaotischen Fehlernetzen eine Fehlerliste mit umfassend beschriebenen und priorisierten Fehlern.

Aus der Fehlerliste geht hervor, dass das Szenario „Elektrischer Kurzschluss“ die höchste Risikobewertung hat. Das potentielle Risiko aus diesem Szenario ist nicht tolerierbar (vgl. Abbildung 61).

Für die anderen, identifizierten Fehlerketten (EMV (3) und Erwärmung des eisernen Rückschlusses (2) (siehe Anhang F)) ergibt sich zwar ein unerwünschtes, aber tolerierbares Risiko.

Das nicht tolerierbare Risiko aus dem Szenario „Elektrischer Kurzschluss“ muss mithilfe geeigneter Maßnahmen präventiv vermieden oder eliminiert werden. Die Herleitung solcher Maßnahmen ist nicht mehr Bestandteil dieser Arbeit.

1 Allgemeine Informationen					
Szenario-ID	Szenario Beschreibung	Versionsstand	Datum der Bearbeitung	Name des Verfassers	
1	Hauptanforderung nicht erfüllt	B	05.09.2019	Mustermann	
2	Erwärmung des eisernen Rückschlusses	C	05.09.2019	Mustermann	
3	EMV	C	05.09.2019	Mustermann	

2 Fehlerursachen					
Funktionsfehler (FF)		Komponentenfehler (KF)		Umweltfaktoren	
Auswahl_FF	Beschreibung_FF	Auswahl_KF	Beschreibung_KF	Auswahl_UF	Beschreibung_UF
		(5) Keine der genannten Optionen	1.1.1.1 Spule U (Phase 1) verursacht einen Kurzschluss aufgrund schlechter Isolierung.		
			Komponenten 2. Sekundärteil und 2.1.1 Leiterplatte realisieren die ungewollte Funktion "Wandeln der ohmschen Verluste der Wirbelströme in Wärme".		
(4) Keine der genannten Optionen	Funktion "Überlagern der Wechselfelder zu Wanderfeld" liefert Input für die ungewollte Funktion "Leiten des Wanderfelds in die Umgebung".	(5) Keine der genannten Optionen	Komponenten 2.1.1 Leiterplatte, 3 Luftspalt und 2 Sekundärteil realisieren die ungewollte Funktion "Leiten des Wanderfelds in die Umgebung".	(2) Feuchtigkeit	Luftfeuchtigkeit beeinflusst die elektromagnetische Felder

3 Wirkung der Fehlerursachen							
Funktionsfehler (FF)		Komponentenfehler (KF)		Umweltfaktoren		Effekte	
Auswahl_FF	Beschreibung_FF	Auswahl_KF	Beschreibung_KF	Auswahl_UF	Beschreibung_UF	Auswahl_EF	Beschreibung_EF
(3) Fehlfunktion	Funktionen „Wandeln von elektrischer Leistung P1 in Wechselfeld B1“ und „Wandeln von Strom und resultierendem Wanderfeld zu Vorschubkraft F“ werden nicht realisiert.					(3) Elektrisch	Elektrischer Kurzschluss
(3) Fehlfunktion	"Wandeln der ohmschen Verluste der Wirbelströme in Wärme"	(5) Keine der genannten Optionen	Komponente 2.2.2 Eiserner Rückschluss überträgt Wärme an Transportgut	(4) Sonstige	Transportgut	(6) Sonstige	Wärmeenergie
(3) Fehlfunktion	Funktionen „Wandeln von elektrischer Leistung P1 in Wechselfeld B1“ und „Wandeln von Strom und resultierendem Wanderfeld zu Vorschubkraft F“ werden nicht realisiert.			(4) Sonstige	Transportgut	(3) Elektrisch	Elektromagnetische Felder

4 Fehlerauswirkung					
auf das technische System		auf den Menschen (Personenschaden)		auf Stakeholder (S)	
Auswahl_TS	Beschreibung_TS	Auswahl_M	Beschreibung_M	Auswahl_S	Beschreibung_S
(1) Gesamt-Systemebene		(2) Nein		(1) Kunden (3) Unternehmen (5) Mitarbeiter	
(2) Teil-Systemebene	Transportgut	(2) Nein		(1) Kunden (3) Unternehmen (6) Eigentümer (7) Inverkehrbringer	
(2) Teil-Systemebene	Transportgut	(2) Nein		(1) Kunden (3) Unternehmen (6) Eigentümer (7) Inverkehrbringer	

5 Risiko des Fehlers	
Risiko	Wert
Nicht tolerierbar	64
Unerwünscht	48
Unerwünscht	48

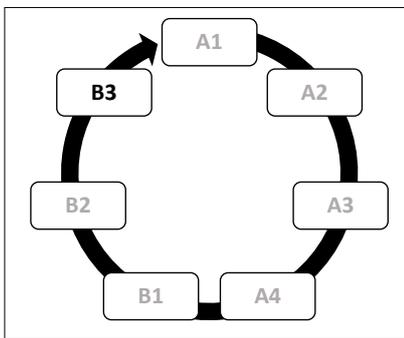
Abbildung 61: Detaillierte Beschreibung der Fehlernetze zu drei erarbeiteten Szenarien für das Q-ELF System im Tool der Fehlerbeschreibung [Eigene Darstellung]

Methodik und Tool zur Umsetzung des sechsten Schrittes der Methodik:

- Quadranten der Wechselwirkungen und
- Tool der ganzheitlichen Fehlerbeschreibung (**Neues Tool**).

Ergebnisse:

- **Strukturierte, einheitlich Beschreibung** aller erarbeiteten Fehlernetze,
- **Detaillierte Beschreibung der Fehlernetze** anhand Ursache, Effekt, Wirkung und Auswirkung oder Folge im Tool der Fehlerbeschreibung und
- Dokumentation (Fehlerliste).



Für eine fundierende Untersuchung des potentiellen, kritischen Fehlers aus dem letzten Schritt steht der **optionale, siebte Schritt** der MemogaFa zur Verfügung. Mithilfe der Informationen aus den Ergebnissen der letzten Schritte kann eine quantitative Methode der Fehleranalyse im Rahmen der Anwendung von MemogaFa durchgeführt werden (z. B. RBD und/oder FTA), um die Eintrittswahrscheinlichkeit eines potentiellen Fehlers mathematisch zu bestimmen.

Die Komponenten und Funktionen, welche für die Durchführung einer quantitativen Methode erforderlich sind, stehen im PSM für eine gezielte Nutzung zur Verfügung.

Ferner kann die Ausfallwahrscheinlichkeit der einzelnen Spulen berechnet werden sowie auch die Auswirkung der elektromagnetischen Wanderfelder auf das Transportgut. Dafür können reale Daten aus der Nutzungsphase (Felddaten) verwendet werden.

Zudem bietet dieser optionale Schritt der Methodik die Einbindung von Simulationen für weiterführende Fehleranalysen [vgl. Wörner 2013]. **Da aber der Fehler in diesem Fallbeispiel vollständig beschrieben wurde, ist eine weiterführende Analyse nicht notwendig.** Vielmehr soll an dieser Stelle auf die Möglichkeiten und das Potenzial der Einbindung von weiteren MdF in die MemogaFa hingewiesen werden.

4.3 Bewertung der entwickelten Methodik anhand von Anforderungen

Um die Nutzbarkeit der entwickelten Methodik (MemogaFa) zu prüfen, wurde diese an zwei Beispiele aus abgeschlossenen DFG-Projekten validiert. Durch die Validierung an zwei Produktsystemen, dem Linearantrieb (DFG-Projekt Q-ELF) und dem Elektrobus (Projekt K-VEC), ist es möglich zu ermitteln, inwieweit MemogaFa die gestellten Anforderungen erfüllt hat. Die nachfolgende Tabelle stellt die Anforderungserfüllung der Methodik übersichtlich dar.

Tabelle 22: Bewertung der Anforderungserfüllung der entwickelten Methodik

Nr.	Anforderungen an die MemogaFa	Bewertung der Anforderungserfüllung
Anforderungen abgeleitet aus den Fehlerdefinitionen (Kapitel 2.1)		
A1	Die Fehlerbeschreibung muss die Wirkungskette (Ursache, Effekt, Wirkung und Auswirkung oder Folge) beinhalten.	Diese Anforderung ist anhand der ganzheitlichen Fehlerdefinition vollständig (vgl. Abbildung 7) erfüllt. - Anforderung erfüllt -
A2	Der Bezug eines Fehlers (z. B. Anforderung, Funktion, Element oder Teils-System) muss in der Beschreibung vorhanden sein.	Der Bezug eines Fehlers zu den Systemelementen ist im Tool für die einheitliche Fehlerbeschreibung vorhanden. - Anforderung erfüllt -
A3	Für eine einheitliche Fehlerbeschreibung soll der Satzbau zur Beschreibung von Fehlern definierte syntaktische Regeln einhalten.	Die definierten Relationen und Elemente in einem Fehlernetz ermöglichen eine einheitliche Fehlerbeschreibung. Allerdings, eine Fehlerbeschreibung mithilfe eines standardisierten Satzes mit syntaktischen Regeln wurde im Rahmen der Entwicklung von MemogaFa nicht mehr realisiert. - Anforderung z.T. erfüllt -

Fortsetzung Tabelle 22

Nr.	Anforderungen an die MemogaFa	Bewertung der Anforderungserfüllung
Anforderungen abgeleitet aus Modellen, Modellierungssprachen und Regeln (Kapitel 2.2):		
A4	Die Modellierung soll nach bestimmten Gestaltungsleitsätzen, Regeln und Notation erfolgen.	Die Modellierung erfolgte nach den im Kapitel 2.2.4 vorgestellten Regeln und Notationen der Modellierung. - Anforderung erfüllt -
A5	Das Systemmodell soll einheitliche Elemente, Relationen und Attribute beinhalten.	Das Systemmodell beinhaltet einheitliche Systemelemente nach den DeCoDe Prinzipien (Anforderungen, Funktionen, Prozesse und Komponenten) sowie Relationen mit einer definierten Syntax. Die Attribuierungen können dabei beliebig erfolgen. - Anforderung erfüllt -
Anforderungen abgeleitet aus der Fehlerbeschreibung (Kapitel 2.3)		
A6	Betrachtung der Felder „Komponenten“, „Funktionen“, „Ereignisse“ und „Effekte“ sowie „Umweltfaktoren“ bei der Fehlerbeschreibung auf grober Ebene.	Diese Betrachtung erfolgt anhand der Quadranten der Wechselwirkungen. - Anforderung erfüllt -
A7	Verarbeitung von Informationen bezüglich „Allgemeine Informationen“, „Fehlerarten“, „Fehlerursachen und Fehlerauswirkungen“ sowie „Fehlerrisiko“.	Die Verarbeitung von Informationen bezüglich „Allgemeine Informationen“, „Fehlerarten“, „Fehlerursachen und Fehlerauswirkungen“ sowie „Fehlerrisiko“ erfolgt anhand des Tools der einheitlichen Fehlerbeschreibung. - Anforderung erfüllt -

Fortsetzung Tabelle 22

Nr.	Anforderungen an die MemogaFa	Bewertung der Anforderungserfüllung
Anforderungen abgeleitet aus den Methoden der Fehleranalyse in der Produktentwicklung (Kapitel 2.4):		
A8	Die MemogaFa soll nicht nur Einfachfehler, sondern auch Fehlerkombinationen, Wechselwirkungen und Beziehungen sowie Abhängigkeiten identifizieren.	Bei der Durchführung der MemogaFa können durch die entwickelten Quadranten der Wechselwirkungen Fehlerkombinationen, Wechselwirkungen, Beziehungen sowie Abhängigkeiten identifiziert werden. - Anforderung erfüllt -
A9	Die MemogaFa soll für mechatronische Systeme anwendbar sein.	Bei den Anwendungsbeispielen K-VEC und Q-ELF handelt es sich um jeweils ein mechatronisches System; damit konnte gezeigt werden, dass MemogaFa für mechatronische Systeme geeignet ist. - Anforderung erfüllt -
A10	Die MemogaFa soll systematisch und iterativ sein.	Die einzelnen Schritte der Methodik interagieren sowohl mit dem Systemmodell als auch mit den unterschiedlichen Methoden der Fehleranalyse. - Anforderung erfüllt -
A11	Die MemogaFa soll das Fehlerrisiko ermitteln.	Das Fehlerrisiko wird mit dem Tool der Fehlerbeschreibung ermitteln. - Anforderung erfüllt -
A12	Die MemogaFa soll Kombinationen von Ursachen betrachten können.	Anhand der Quadranten der Wechselwirkungen werden Kombinationen von Ursachen betrachtet. - Anforderung erfüllt -
A13	Die MemogaFa soll die Wechselwirkungen unterschiedlicher Systemelemente auch bei einem komplexen System transparent darstellen.	MemogaFa stellt sowohl die Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Systemelementen (Funktionen und Komponenten) als auch zwischen diesen und den Umweltfaktoren transparent dar. - Anforderung erfüllt -

Fortsetzung Tabelle 22

Nr.	Anforderungen an die MemogaFa	Bewertung der Anforderungserfüllung
Anforderungen abgeleitet aus den Methoden der Fehleranalyse in der Produktentwicklung (Kapitel 2.4):		
A14	Die MemogaFa soll Ursache-Wirkungs-Beziehungen identifizieren.	Auf Basis der ganzheitlichen Fehlerdefinition und mithilfe der Quadranten der Wechselwirkungen sowie des Tools zur Fehlerbeschreibung konnten die Beziehungen zwischen Ursachen-Effekte-Wirkungen und Auswirkungen eindeutig identifiziert werden. - Anforderung erfüllt -
A15	Die MemogaFa soll zeitliche Abhängigkeiten im Systemmodell darstellen bzw. erfassen.	Der zeitliche Verlauf und zeitliche Abhängigkeiten, wie beispielsweise bei einem Markov-Modell, konnten im Systemmodell nicht dargestellt werden. Jedoch gibt es eine zeitliche Reihenfolge bei der Identifizierung der Fehlernetze. - Anforderung z.T. erfüllt -
A16	Die MemogaFa soll für kleine und große Systeme geeignet sein.	Die Methodik ist sowohl für kleine als auch für große Systeme, wie am Beispiel K-VEC gezeigt, geeignet. - Anforderung erfüllt -
A17	Die MemogaFa soll für die Produktentwicklungsprozesse und ihre iterativen Veränderungen geeignet sein.	Die Resultate aus der Methodik fließen in die frühen Phasen der Produktentwicklung ein, um potentielle Fehler präventiv zu vermeiden. Zudem bietet das Systemmodell nützliche Informationen für verschiedene Phasen der PE. - Anforderung erfüllt -

Während andere Methoden (Ishikawa, FMEA etc.) nur Teile dieser Anforderungsliste erfüllen (vgl. Tabelle 14), ist MemogaFa die einzige Methodik, die alle Anforderungen erfüllt. Dies bringt allerdings auch einen höheren Aufwand bei der Durchführung der Methodik mit sich. Inwiefern der höhere Aufwand gerechtfertigt ist, hängt vom Anwendungsbeispiel ab. Je komplexer das zu betrachtende System ist, desto höher ist der Aufwand bei der Durchführung der MemogaFa. In einem komplexen System verbergen sich potentielle Fehler mit großen Risiken und Auswirkungen auf die Existenz des Unternehmens. Durch die Nutzung der MemogaFa können diese Fehler identifiziert werden. Daher erweist sich die Nutzung als wirtschaftlich und gerechtfertigt, trotz des hohen Aufwands.

5 Fazit und Ausblick

Die Herstellung von Produkten mit hoher Qualität steht im Fokus der Unternehmen. Qualitativ hochwertig sind die Produkte erst dann, wenn sie in der Nutzungsphase fehlerfrei funktionieren. Die Sicherstellung eines fehlerfreien Produkts ist nicht nur für das Image und die Marktfähigkeit eines Unternehmens wichtig, sondern spielt auch durch das Produkthaftungsgesetz eine ausschlaggebende Rolle. Um dies zu gewährleisten, nutzen Unternehmen unterschiedliche „Hilfsmittel“ (Methoden der Fehleranalyse). Jedoch reichen diese heutzutage nicht mehr aus, um eine ganzheitliche Fehleranalyse bei komplexen, mechatronischen Produkten zu realisieren [Preiss 2009; DIN EN 60812; Mamrot et al. 2015].

Die bisherigen Methoden können die Komplexität und die Vielfalt an potentiellen Fehlerursachen nicht mehr handhaben bzw. erfassen. Infolge werden umfassende Zusammenhänge bei sogenannten Fehlerketten nicht betrachtet. Zudem wird die Wechselwirkung zwischen einem technischen System mit seiner Umwelt nicht (vollständig) erfasst und berücksichtigt [Hitchins 2007]. Daraus wurde die erste Forschungslücke hergeleitet → „(1) Die aktuellen Methoden der Fehleranalyse (MdF) behandeln „nur“ Teilaspekte von Fehlern (beispielsweise werden die Umweltfaktoren ungenügend berücksichtigt), zudem werden Wechselwirkungen und gegenseitige Beeinflussungen unzureichend betrachtet.“ Ein standardisiertes Modell soll dafür als mögliche Lösung fungieren. Es hat sich herausgestellt, dass ein standardisiertes Modell mit einem „erweiterten Blick“ auf die potentielle Nutzungsphase (z. B. Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Produkt und Umwelt) eine weitere Forschungslücke darstellt → „(2) Ein standardisiertes Modell (als mögliche Lösung der oben genannten Problematik) mit einer erweiterten Betrachtung (z. B. von Umweltfaktoren) ist ein Desiderat in der Wissenschaft und Praxis.“

Im Kontext zur Fehleranalyse war es erforderlich zu analysieren, wie der Begriff „Fehler“ definiert wird. Eine nationale und internationale Literaturanalyse ergab, dass der Begriff „Fehler“ nicht konkret bzw. unterschiedlich definiert wird, was zu einem unterschiedlichen Fehlerverständnis führt. Aus dieser Erkenntnis heraus, resultierte die dritte Forschungslücke → „(3) Es gibt unterschiedliche Fehlerdefinitionen, die nicht kohärent sind, und Fehler unterschiedlich beschreiben.“

Aus den Forschungslücken wurden Forschungsfragen hergeleitet, die mithilfe von fünf Forschungsfeldern beantwortet werden sollten (vgl. Kapitel 1):

- Forschungsfeld 1: Fehlerdefinition
- Forschungsfeld 2: Modelle, Modellierungssprachen und Softwaresysteme
- Forschungsfeld 3: Fehlerbeschreibung und Informationen
- Forschungsfeld 4: Methoden der Fehleranalyse in der Produktentwicklung
- Forschungsfeld 5: Entwicklung und Validierung der MemogaFa

Anhand der fünf Forschungsfelder sollte das Ziel dieser Arbeit erreicht werden: Die Entwicklung einer Methodik für eine modellbasierte und ganzheitliche Fehleranalyse (MemogaFa) mit dem Fokus auf die Nutzungsphase eines Produktsystems. Dafür war geplant, dass die einzelnen Ergebnisse und Erkenntnisse aus den Forschungsfeldern in die neu zu entwickelnde MemogaFa einfließen. Im Folgenden werden die kondensierten Resultate aus den einzelnen Forschungsfeldern vorgestellt.

- **Forschungsfeld 1: Fehlerdefinition**

Im Rahmen dieses Forschungsfeldes lag der Forschungsschwerpunkt auf dem Begriff „Fehler“ oder Definitionen von Fehlern, sowie Arten und Klassifizierungen von Fehlern. Dafür erfolgte eine umfassende Recherche in der technischen, nationalen und internationalen Fachliteratur. Die Essenz dieser Literaturrecherche und -analyse ist der Tabelle 1 zu entnehmen. Zusammengefasst lässt sich sagen, dass die Definitionen sowohl Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede aufweisen.

Außerdem beziehen sich die meisten Fehlerdefinitionen entweder auf eine Funktion, eine Anforderung, eine Komponente oder ein (Teil-) System [vgl. DIN 55350; DIN EN ISO 9000:2015; ISO 26262-1; Bertsche et al. 2009; IEC 62059-31-1; IEC 61508; Isermann 2006]. Diese unterschiedlichen Fehlerdefinitionen führen in der Praxis zu Missverständnissen sowie zu ungeeigneten Lösungsansätzen, wie das Beispiel 737 Max zeigt [Fokus online 2019]. Um unterschiedliche Fehlerdefinitionen zusammenzuführen und transparent darzustellen, wurde eine standardisierte Systemmodellierung vorgeschlagen [Winzer 2016]. Damit konnten Fehlerdefinitionen in die DeCoDe-Sichten integriert werden. Überdies konnte aus mehreren Quellen eine ganzheitliche Beschreibung einer Fehlerentstehung hergeleitet werden (vgl. Kapitel 2.1.1.1). Demnach besteht ein Fehler aus Ursache, Effekt, Wirkung und Auswirkung oder Folge [vgl. Westkämper 1997; Zingel 2013]. Diese ganzheitliche Beschreibung des Fehlers wurde in das neu entwickelte Tool zur Fehlerbeschreibung integriert, explizit in die Abschnitte Fehlerursachen (2), Wirkung der Fehlerursache(n) (3) und Fehlerauswirkung(en) (4). Zudem wurde die „Effekte“ in die Quadranten der Wechselwirkungen implementiert. Die negativen Auswirkungen eines Effekts belegen die Anwendungsbeispiele aus Kapitel 4.

Für eine umfassende Fehlerbeschreibung sind auch Fehlerarten und Fehlerklassifizierung (Kapitel 2.1.1.2) relevant. Aus einer profunden Normen- und Literaturanalyse resultieren die Ergebnisse aus Tabelle 2. Diese zeigt, wie Vielfältig die Kategorisierung und Klassifizierung von Fehlern (z. B. nach Ursachen, Form des Auftretens, Auswirkung, Ausfallart, Schweregrad usw.) sein können [vgl. Halang, 2013; Isermann 2006; Bertsche 2009; Reif 2012; DIN EN 60812]. Dabei liefert die Tabelle 2 einen weiteren Input für das Tool der einheitlichen Fehlerbeschreibung. Beispiel hierzu ist u. a. die Ausfallart von Komponenten (primär, sekundär, kommandierend und kaskadierend), welche in das zweite Fenster des Tools als wählbare Option integriert wurde (vgl. Kapitel 3.1.2).

Damit bauen die neu entwickelten Tools zur Fehlerbeschreibung und -analyse auf den Ergebnissen zum Forschungsfeld „Fehlerdefinition“ auf. Des Weiteren sind auch Forschungserkenntnisse aus den anderen Forschungsfeldern in die Tools eingeflossen. So war im Forschungsfeld 2 im Hinblick auf die Untersuchung unterschiedlicher Modelle und Ansätze zur Modellierung zu prüfen, inwiefern die Erkenntnisse aus Forschungsfeld 1, die Auswahl eines geeigneten Ansatzes beeinflussen.

- **Forschungsfeld 2: Modelle, Modellierungssprachen und Softwaresysteme**

Die Notwendigkeit eines Systemansatzes für die ganzheitliche Fehleranalyse wurde mehrfach dargelegt [vgl. Schnellbach 2016; Winzer 2016; DIN EN 60812; Krishna 2008]. Dabei gibt es unterschiedliche Ansätze für die Modellierung in der PE. Um den geeigneten Ansatz für MemogaFa zu eruieren, wurden die Ansätze anhand von Anforderungen aus dem Forschungsfeld 1 sowie der Zielstellung der Arbeit bewertet.

Aus der Bewertung geht hervor, dass der DeCoDe-Ansatz am besten geeignet ist (vgl. Kapitel 2.2.2, Tabelle 6). Daher wurde DeCoDe für den dritten Schritt der MemogaFa (einfache Modellierung des Produktsystems mit Fokus auf den kritischen, potentiellen Nutzungsprozess aus Schritt 2) genutzt. Zudem sind die DeCoDe-Sichten feste Bestandteile des Tools zur einheitlichen Fehlerbeschreibung.

Die Ergebnisse aus der Untersuchung zu den spezifischen Relationen, Systemelementen und deren Attribuierungen wurden für die einfache und erweiterte Modellierung (im dritten und vierten Schritt der MemogaFa) sowie die Beschreibung von Szenarien (oder Fehlernetz) implementiert. Zusätzlich wurden die Regeln der Modellierung (aus dem Kapitel 2.2.4) im Rahmen der Modellierung umgesetzt. Erst auf Basis der Modellierung ist eine umfassende Fehlerbeschreibung möglich, welche im Folgenden zusammengefasst wird.

- **Forschungsfeld 3: Fehlerbeschreibung und Informationen**

Um eine „Informationsflut“ zu bewältigen, muss der Vorgang zur Informationsbeschaffung für die ganzheitliche Fehleranalyse strukturiert und systematisch ablaufen. Dies gilt auch für MemogaFa. Es ist wichtig, den Umfang an Informationen zu filtern, um sich nur auf die, für die Fehleranalyse, relevanter Informationen zu fokussieren. Deswegen erfolgt die Vorgehensweise zur Informationsbeschaffung nach dem Leitsatz des Top-Down-Prinzips [vgl. Winzer 2016], in dem der Weg von einer groben Informationsebene zu einer detaillierten Informationsebene empfohlen wird. Zunächst werden alle Informationen gesammelt, welche einen direkten Bezug zum potentiellen und kritischen Nutzungsprozess haben. Auf diese Weise werden die „Felder“ der Quadranten der Wechselwirkungen vervollständigt und dienen später als Plattform für die Bildung von Fehlernetzen. Dabei bleibt die Strukturierung auf einer groben Ebene. Für eine Strukturierung der Fehler auf einer detaillierten Ebene ist die Nutzung der ganzheitlichen Fehlerbeschreibung gedacht. Dieses Vorgehen wird im

Rahmen der Entwicklung von MemogaFa im Kapitel 3 gezeigt. Zudem wurden für die Entwicklung der MemogaFa, Anforderungen aus den MdF hergeleitet und berücksichtigt. Dafür erfolgte eine fundierende Untersuchung der MdF, die nachfolgend erläutert wird.

- **Forschungsfeld 4: Methoden der Fehleranalyse in der Produktentwicklung**

In diesem Forschungsfeld wurden MdF, welche in der PE genutzt werden, nach definierten Teilaspekten (z. B. Ziel, Anwendung, struktureller Aufbau, In- und Output sowie Vor- und Nachteile) analysiert. Die detaillierte Analyse befindet sich im Anhang B.

Durch diese Analyse soll das erforderliche Wissen geschaffen werden, um die Methoden erfolgreich in die MemogaFa, insbesondere im siebten Schritt der Methodik, zu integrieren. Zudem wurden aus den Nachteilen der Methoden die meisten Anforderungen an MemogaFa hergeleitet [vgl. Klipper 2015; DIN EN 31010; Kamiske 2013; Schnieder 2013]. Die Anforderungslisten aus den Forschungsfeldern 1 bis 4 sind grundlegend für die Entwicklung der MemogaFa im fünften Forschungsfeld.

- **Forschungsfeld 5: Entwicklung und Validierung der MemogaFa.**

Mit den Forschungsfeldern 1 bis 4 wurden die theoretischen Grundlagen und die Basis für die Herleitung und die Entwicklung der MemogaFa erschaffen. Darauf aufbauend erfolgte die Herleitung der MemogaFa in zwei Phasen. Die erste Phase besteht aus der Bereitstellung der Informationen für die Fehleranalyse und -beschreibung. Der erste Filter für diese Informationen ist die Festlegung eines potentiell kritischen Nutzungsprozesses in der Nutzungsphase des Produktsystems. Dadurch wird der Aufwand der Modellierung erheblich reduziert. Die Modellierung innerhalb der ersten Phase erfolgt in zwei Schritten. Zuerst wird das Produktsystem (PS) modelliert und als Ergebnis entsteht das Produktsystemmodell (PSM). Für die erweiterte Modellierung im Sinne einer ganzheitlichen Fehleranalyse wurde ein Tool (Quadranten der Wechselwirkungen) neu entwickelt.

Die einzelnen Quadranten sowie deren Notwendigkeit wurden aus der Literatur hergeleitet [vgl. Breidert 2007; Schlund 2011; Mamrot 2014]. **Das Neue** dabei ist, dass **das Tool die wesentlichen Aspekte (Komponenten und Funktionen des PSM, Umweltfaktoren, Ereignisse und Effekte) gegenüberstellt. Es eröffnet somit die Möglichkeit, Wechselwirkungen transparent darzustellen und zu identifizieren. Nur durch die Betrachtung der Wechselwirkungen können Fehlerketten identifiziert werden, die nicht entdeckt würden, wenn nur eine einzelne Wirkung betrachtet wird (wie z. B. bei Ishikawa oder FMEA).**

In der zweiten Phase der MemogaFa erfolgt dann die Fehleranalyse beginnend mit der Bildung der Fehlernetze anhand von Szenarien. Hierbei werden mithilfe der Fehlernetze unterschiedliche Szenarien generiert. Auf dieser groben Ebene wird die ganzheitliche Fehleranalyse durchgeführt, weil

alle Faktoren (PSM, Effekte, Ereignisse und Umweltfaktoren), die einen potentiellen negativen Einfluss auf den kritischen Nutzungsprozess haben, berücksichtigt werden. Einzelne Fehlernetze werden dann in das Tool zur ganzheitlichen Fehlerbeschreibung überführt. Mit dem Tool, welches aufbauend auf den Resultaten aus den Forschungsfeldern 1, 2 und 3 entwickelt wurde, werden Fehler (oder Fehlernetze) strukturiert und detailliert beschrieben.

Dieses programmierte Tool ist neu, da es die **Ergebnisse aus Literatur** (Fehlerdefinitionen, -arten und -klassifizierungen, vgl. Tabelle 1 und 2) **komprimiert und gebündelt nutzt**, wodurch **Fehler einheitlich in Form einer Excel Tabelle beschrieben** werden.

Der letzte Schritt der MemogaFa besteht aus der Integration einer Methode der Fehleranalyse in die Methodik. Dies ist ein optionaler Schritt und kommt erst dann zur Anwendung, wenn Ursachen und Auswirkungen nicht vollständig identifiziert worden sind, oder Daten für eine quantitative MdF zur Verfügung stehen. Zudem können in diesem Schritt Simulationen für eine weiterführende Fehleranalyse integriert werden. Für die Auswahl der richtigen Methode der Fehleranalyse wird an dieser Stelle aus den Erkenntnissen aus dem Forschungsfeld 4 zurückgegriffen.

Um die Nutzbarkeit der Methodik festzustellen, sowie den Grad der Erfüllung des Ziels dieser Arbeit (Entwicklung einer Methodik für eine modelbasierte und ganzheitliche Fehleranalyse für die Anwendung in der PE und mit dem Fokus auf der Nutzung eines Produktsystems), wurde die Methodik an zwei Beispielen validiert. Im Rahmen der Validierung ergaben sich **Vor- und Nachteile der MemogaFa**, die im Folgenden beschrieben werden.

Vorteile der MemogaFa:

- Systematische Analyse der potentiellen Nutzungsprozesse des zu betrachtenden Produkts in der Nutzungsphase,
- Nutzung des Expertenwissens und -erfahrungen zur Bestimmung kritischer, potentieller Nutzungsprozesse,
- Zweckgebundene Modellierung des betrachteten Produkts und damit die Erschaffung von mehr Verständnis und Transparenz für mechatronische, komplexe Produkte (z.B. anhand einer MDM und der Fokusfunktion der Software LOOME0),
- Systematische Erfassung relevanter Faktoren (Effekte, Ereignisse und Umweltfaktoren), welche potentielle Fehler in einem Nutzungsprozess verursachen können, anhand von „Checklisten“ aus der Fachliteratur,
- Generierung von Szenarien mit potentiellen Fehlernetzen mithilfe des Expertenwissens und den Quadranten der Wechselwirkungen als Tool,
- Fehlerbeschreibungen auf unterschiedlichen Ebenen (vom Groben zum Detail),

- Nutzung eines neuen Tools zur Fehlerbeschreibung, welches die Ergebnisse intensiver Literaturanalyse zu den Definitionen von Fehlern sowie auch Arten und Kategorien von Fehlern synthetisiert und strukturiert,
- Dokumentation und Priorisierung von potentiellen Fehlern in der zukünftigen Nutzungsphase eines Produktsystems,
- Ganzheitliche Betrachtung der Fehleranalyse in der potentiellen Nutzungsphase unter der Berücksichtigung von Interaktionen und Wechselwirkungen zwischen Produktsystem (potentielle Nutzungsprozesse, Komponenten und Funktionen), Effekten sowie Umweltfaktoren und Ereignissen,
- Erhöhung der Erfüllung der Hauptanforderung an das gesamte PSM und
- Erhöhung der Erfüllung von Produkthaftungsgesetz durch eine präventive Identifizierung potentieller Fehler, die zu Personenschaden führen können.

Nachteile der MemogaFa:

- Großer Zeitaufwand sowohl bei der einfachen als auch bei der erweiterten Modellierung,
- die Überführung aus den Quadranten der Wechselwirkungen in das Tool zur einheitlichen Fehlerbeschreibung muss händisch erfolgen und ist mit viel Aufwand verbunden,
- bei einer hohen Anzahl an Elementen in den Quadranten der Wechselwirkungen wird das Tool unübersichtlich und somit die Anwendung sehr schwer, deshalb ist die Nutzung der Methodik für die industrielle Praxis ohne entsprechende IT-Unterstützung nur bedingt geeignet,
- die Funktionsweise des angewendeten Softwaresystems (LOOME) beschränkt die Anwendung der MemogaFa, exemplarisch an dieser Stelle sei die Bezeichnung für Relationen genannt, die in LOOME nicht individualisiert werden kann und
- im Rahmen dieser Arbeit wurde eine einheitliche Fehlerbeschreibung mittels Excel-Tool realisiert. Wünschenswert wäre es, solche Fehlerbeschreibungen in standardisierten Sätzen mit geregelter Syntax in entsprechend ausgelegten IT-Systemen zu verfassen.

Ausgehend von den Vorteilen und den Nachteilen der MemogaFa können zwei weitere Forschungsarbeiten als Ausblick abgeleitet werden: Das Potenzial einer Kopplung der MemogaFa mit der ISO 26262 (Funktionale Sicherheit) sowie der Bedarf an einer Fehlerbeschreibung anhand von standardisierten Sätzen mit geregelter Syntax.

- **Forschungsvorhaben 1: Kopplung der MemogaFa mit der Funktionalen Sicherheit nach ISO 26262**

Die ursprüngliche Norm Funktionale Sicherheit (FuSi), die Norm 61508, legt den Fokus auf die Gewährleistung der Sicherheit und Funktionalität von sicherheitsbezogenen Systemen [vgl. Börcsök 2006; IEC 61508]. Damit sind alle Systeme gemeint, welche sicherheitsbezogene, elektrische, elektronische und/oder programmierbare Komponenten beinhalten, die eine Sicherheitsfunktion erfüllen. Ein Ausfall dieser Komponenten und somit auch der Sicherheitsfunktionen führt zu Auswirkungen und Folgen hinsichtlich der Sicherheit von Personen. Daher wird FuSi allgemein als „die Fähigkeit, die festgelegten Sicherheitsfunktionen zuverlässig und spezifikationsgemäß auszuführen“ bezeichnet [Halang 2013, S. 1].

Aus der Norm 61508 ist im Jahr 2011 die ISO 26262 zur FuSi mit dem Fokus auf Kraftfahrzeuge entstanden. Schwerpunkt ist die Generierung und Umsetzung von funktionalen Sicherheitsanforderungen, welche an elektrische, elektronische und/oder programmierbare Komponenten gestellt sind. Damit sind im Sinne von ISO 26262 die Hard- und Softwarekomponenten (z. B. Steuergerät eines Kraftfahrzeuges), welche in ein Fahrzeug eingebaut werden, gemeint [vgl. ISO 26262].

Die Sicherheitsanforderungen resultieren aus den sogenannten Sicherheitszielen (eng. Safety Goals). Die Sicherheitsziele ergeben sich wiederum aus der Bewertung anhand der ASIL (Automotive Safety Integrity Level) Systematik. Diese besteht aus drei Kriterien: Schwere eines möglichen Schadens (engl. Severity S), Häufigkeit der Fahrsituation (engl. Probability of Exposure E) und die Beherrschbarkeit durch den Fahrer (engl. Controllability C) [Hillenbrand 2012].

Mithilfe der ASIL werden die potentiellen Gefährdungen und Risiken bewertet, welche aus der Gefährdungsanalyse und Risikobewertung (z. B. anhand FMEA, FTA) resultieren. Aus den identifizierten Fehlern und Risiken lassen sich die Sicherheitsziele und die funktionalen Sicherheitsanforderungen, die Kernbestandteile der FuSi, ableiten. Demzufolge spielen die Gefährdungsanalyse und Risikobewertung eine essentielle Rolle für FuSi. Eine verlässliche Abschätzung der Gefährdung und des Risikos ist schwierig zu realisieren aufgrund immer kürzerer Entwicklungszeiten mechatronischer Produkte und die rapide steigende Komplexität beim autonomen Fahren. Zudem ist das zu betrachtende System in seiner Nutzung nicht mehr nur das Auto allein, sondern das Auto in Interaktion mit den umgebenden Objekten. Dies erfordert eine erweiterte Betrachtung der Systemgrenze und die damit einhergehende Steigerung der zu analysierenden Elemente und Wechselwirkungen, die ursächlich für die Fehlerentstehung sein können.

Für die präventive Identifikation potentieller Fehler empfiehlt die Norm, die Anwendung der bisher bekannten MdF (u. a. FMEA). Jedoch die MdF können die komplexen Zusammenhänge, Beziehungen und Wechselwirkungen nicht mehr ausreichend erfassen [vgl. Preiss 2009; DIN EN 60812; Schnellbach 2016].

An dieser Stelle weist die MemogaFa ein großes Nutzungspotenzial für die konsequente und systematische Umsetzung der FuSi. Denn die Quadranten der Wechselwirkungen aus MemogaFa (vgl. Kap. 3) können ergänzend zu den empfohlenen MdF aus der Norm [vgl. ISO 26262 Teil 3, S. 8] angewendet werden. Dadurch können Zusammenhänge, Beziehungen und Wechselwirkungen zwischen einem technischen PSM und seiner Umgebung systematisch identifiziert werden. Somit eignet sich MemogaFa sehr gut, um **potentielle Fehler aus den Wechselwirkungen zwischen dem Auto und seiner Umgebung in einem kritischen Nutzungsprozess tief zu analysieren**. Vor allem bei der Generierung von Sicherheitsanforderungen, welche sich aus potentiellen Fehlern in unterschiedlichen Anwendungsfällen ergeben können (wie im Kapitel 4 nachgewiesen), kann MemogaFa aufgrund ihrer **umfassenden und ganzheitlichen Fehleranalyse** unterstützend und synergetisch wirken. Zudem bieten die Dokumentation und Risikoeinstufung der Fehler in MemogaFa einen Nachweis über eine umfassende Durchführung von Fehleranalysen gegenüber der ISO 26262 und dem Produkthaftungsgesetz im Falle von unbeabsichtigten Folgeschäden bei der Nutzung eines Produkts.

Bei einer ersten Studie zum Abgleich zwischen der Vorgehensweise aus der Funktionalen Sicherheit nach ISO 26262 und dem Konzept der MemogaFa ist festgestellt worden, dass weitere kompatible Eigenschaften existieren. So konnte die DeCoDe-Modellierung angewendet werden, um die Anforderungen- Funktionen- und Komponentenstruktur abzubilden. Zudem entsprechen die in MemogaFa verwendeten MdF den Forderungen der ISO 26262 [Bielefeld et al., 2019]. Dies alles spricht für ein hohes Potenzial der MemogaFa bezüglich ihrer Anwendbarkeit im Rahmen der FuSi.

Jedoch sind weitere Studien notwendig, um die Quadranten der Wechselwirkungen sowie das Tool zur Fehlerbeschreibung im Rahmen der Umsetzung von FuSi einzusetzen. Damit können potentielle Fehler, die zu Personenschaden führen können, in der Nutzungsphase ganzheitlich identifiziert und umfassend beschrieben werden. Deshalb kann eine „Verschmelzung“ von MemogaFa und FuSi als ein erstrebenswerter und nutzbringender Forschungsschwerpunkt angesehen werden. Doch neben der Nutzung der MemogaFa in anderen Anwendungsbereichen gibt es auch weiteren Forschungsbedarf bezüglich konkreter Details der Methodik. Ein Detail ist die bislang nicht berücksichtigte Syntax der standardisierten Fehlerbeschreibung.

- **Forschungsvorhaben 2: Fehlerbeschreibung anhand von standardisierten Sätzen mittels geregelter Syntax**

Wie bereits festgestellt, werden Fehler in der Fachliteratur oder Normen zu den MdF nicht einheitlich und eindeutig definiert [vgl. VDI 2006; DIN 25424; IEC 61025]. Dies führt dazu, dass es zu unterschiedlichem Fehlerverständnis im Rahmen der Methodenanwendung kommt [vgl. Willing und Winzer 2015]. Insbesondere bei den Kombinationen zwischen unterschiedlichen Methoden der Fehleranalyse, bspw. Ishikawa mit der FMEA (wie in VDA 2006 empfohlen), können die Ergebnisse aus der Anwendung der Methoden inkonsistent sein, da der Fehlerbegriff und die Fehlerbeschreibung nicht kohärent sind. Daraus resultiert der Bedarf für eine einheitliche Fehlerdefinition sowie Fehlerbeschreibung (wie in den Kapiteln 1.1 und 2.1 nachgewiesen).

Die, für die Fehlerbeschreibung, erarbeitete Lösung der MemogaFa basiert bislang auf den Fehlerklassifizierungen, -arten und dem Systembezug. Diese Regeln wurden im ganzheitlichen Fehlerbeschreibungstool auf Excel-Basis umgesetzt und erfolgreich getestet (siehe Kapitel 3). Die Beschreibung des Fehlers besteht somit aus einzelnen Satzbausteinen bzw. Inhalten, die bei der textuellen Beschreibung zu beachten sind. Dies lässt einiges an Spielraum bei der Gestaltung des Textes der Fehlerbeschreibung zu.

Erkenntnisse aus dem Requirements Engineering belegen, dass eine noch umfassendere Regelung oder Standardisierung der textuellen Beschreibung nicht nur die Eindeutigkeit, sondern auch die Weiterverarbeitung von Anforderungen optimiert [Rupp 2014]. Eine Fehlerdefinition, z. B. „Nichterfüllung einer Anforderung“ [vgl. DIN EN ISO 9000:2015], konvergiert teilweise mit der Struktur der Anforderungsbeschreibung nach Rupp [Rupp 2014]. Insofern stellt sich die Forschungsfrage, inwiefern eine standardisierte Satzbauvorgabe auf Basis geregelter Syntax, die Ergebnisse der Fehlerbeschreibung bezüglich des eindeutigen Verständnisses und hoher Informationsqualität verbessern kann.

Im Rahmen einer Studie kann untersucht werden, ob eine detailliertere Vorgabe für den textlichen Aufbau der Fehlerbeschreibung (bzgl. Eindeutigkeit, Verständnis, Konsistenz usw.) eine Verbesserung hervorbringt. Dafür ist zunächst erforderlich, eine entsprechende „Satz-Schablone“ auf Basis der MemogaFa-Forderungen zu entwickeln. Diese ist in das vorhandene Excel-Tool zu implementieren, so dass einzelne Worte bzw. Textbausteine aus dem Tool zur einheitlichen Fehlerbeschreibung automatisch in einen ganzen Satz zusammenfließen, welcher den Fehler möglichst präzise und zugleich umfassend beschreibt. Ein Abgleich der Ergebnisse des bisherigen Tools mit den Ergebnissen des zu entwickelnden Tools zur standardisierten Fehlerbeschreibung mit geregelter Syntax kann im Rahmen eines Laborversuchs oder mithilfe einer Expertenbefragung erfolgen. Zudem kann anhand einer Studie identifiziert werden, ob eine standardisierte Fehlerbeschreibung mittels

geregelter Syntax, wichtige Kriterien (z. B. Eindeutigkeit, Verständlichkeit, Nachvollziehbarkeit, Verfolgbarkeit usw.) hinsichtlich der Fehlerdokumentation erfüllt und somit eine positive Wirkung nachweist. Zeigt die Studie, dass eine Syntaxreglementierung positive Auswirkungen auf die Fehlerdokumentation hat, spricht dies für eine Realisierung von standardisierten Sätzen zur Fehlerbeschreibung. Infolge kann sich daraus ein weiterer, aussichtsvoller Forschungsschwerpunkt ergeben.

6 Literaturverzeichnis

- [Ackermann 2007] Ackermann, J. (2007): Modellierung, Planung und Gestaltung der Logistikstrukturen kompetenzzellenbasierter Netze; In: Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme; Heft 59; TU Chemnitz, Institut für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme; Chemnitz.
- [AIAG und VDA 2019] Automotive Industry Action Group (AIAG) und Verband der Automobilindustrie (2019): FMEA-Handbuch, Design-FMEA, Prozess-FMEA, FMEA-Ergänzung - Monitoring & Systemreaktion, veröffentlicht durch AIAG; USA.
- [Algedri und Frieling 2015] Algedri, J. und Frieling, E. (2015): Human-FMEA. Menschliche Handlungsfehler erkennen und vermeiden; Carl Hanser Verlag; München.
- [Alt 2012] Alt, O. (2012): Modellbasierte Systementwicklung mit SysML. in der Praxis; Carl Hanser Verlag; München.
- [Badke-Schaub et al. 2012] Badke-Schaub, P.; Hofinger, G.; Lauche, K. (2012): Human Factors -Psychologische sicheren Handelns in Risikobereichen; Springer Verlag; Berlin, Heidelberg.
- [Bertsche et al. 2004] Bertsche, B. und Lechner, G. (2004): Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau – Ermittlung von Bauteilen und System-Zuverlässigkeit; Springer Verlag; Berlin, Heidelberg.
- [Bertsche et al. 2009] Bertsche, B.; Gäng, J. (2009): Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme. Grundlagen und Bewertung Grundlagen und Bewertung in frühen Entwicklungsphasen; Springer Verlag; Berlin, Heidelberg.
- [Bertsche et al. 2016] Bertsche, B. und Stohrer, M. (2016): Zuverlässigkeit und Sicherheit; In: Lindemann, U. (Hrsg): Handbuch Produktentwicklung; Carl Hanser Verlag; München.
- [Bielefeld et al. 2019] Bielefeld, O.; Schlüter, N.; Heinrichsmeyer, M. (2019): Schnittstellen zwischen der KAUSAL-Methodik und der Funktionalen Sicherheit nach ISO 26262; In: Tagungsband, 29. VDI-Fachtagung, Technische Zuverlässigkeit 2019 - Entwicklung Betrieb zuverlässiger Produkte; Nürtingen bei Stuttgart, Deutschland, 07.-08.05.2019, ISBN 9783180923451, pp. 129-142.

-
- [Binfet-Kull et al. 1999] Binfet-Kull, M.; Heitmann, P.; Meyna, A. (1999): Systemsicherheit für ein autonom fahrendes Fahrzeug; Business Unit Forschung Umwelt und Verkehr; Wolfsburg.
- [Braunholz 2006] Braunholz, H. (2006): Werkzeugentwicklung für informationsflussorientierte Prozessmodelle, Shaker Verlag, Aachen.
- [Braidert 2007] Braidert, J. (2007): Schnittstellengestaltung für die Baukastensynthese mit Beispielen aus der Formgedächtnisaktuatorik; Dissertation; Shaker Verlag; Aachen.
- [Brudniok 2007] Brudniok, S. (2007): Methodische Entwicklung hochintegrierter mechatronischer Systeme am Beispiel eines humanoiden Roboters; Dissertation; E&B-printware; Karlsruhe.
- [Brückner 2013] Brückner, C. (2013): Fehlerbaumanalyse (Fault Tree Analysis). In: Kamiske, G.: Handbuch QM-Methoden; Carl Hanser Verlag; München.
- [Börcsök 2006] Börcsök, J. (2006): Funktionale Sicherheit: Grundzüge sicherheitstechnischer Systeme; Hüthig Verlag; ISBN 9783778529850.
- [Bursac 2016] Bursac, N. (2016): Model Based Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung; Dissertation; Stolzenberger Druck und Werbung GmbH & Co. KG; Leimen.
- [Chase 1974] Chase, W. P. (1974): Management of Systems Engineering (Wiley Series on Systems Engineering and Analysis); Wiley; ISBN 9780471149156.
- [DIN 25424] DIN 25424 (1981): Fehlerbaumanalyse, Normenausschuß Kerntechnik (NKe) im DIN (Deutsches Institut für Normung), Berlin.
- [DIN 61078] DIN EN 61078:2006 (Deutsche Fassung zu IEC 61078) (2006): Techniken für die Analyse der Zuverlässigkeit-Zuverlässigkeitsblockdiagramm und Boole'sche Verfahren; DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE; Beuth Verlag; Berlin.

- [DIN 55350] DIN 55350 (1985): Begriffe zum Qualitätsmanagement und Statistik-Teil 31; Beuth Verlag, Berlin, S. 2.
- [DIN 40042] DIN 40042:1970-06 (1970): Zuverlässigkeit elektrische Geräte, Anlagen und Systeme; Begriffe; Beuth Verlag, Berlin.
- [DIN 40041] Norm DIN 40041 (1990): Zuverlässigkeit, Begriffe; Beuth Verlag; Berlin.
- [DIN EN 60812] Europäische Norm DIN EN 60812 (2006): Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen-Verfahren für die Fehlzustandsart und -auswirkungsanalyse (FMEA); Beuth Verlag, Berlin.
- [DIN EN 31010] DIN EN 31010 (2010): Risikomanagement-Verfahren zur Risikobeurteilung; Deutsche Fassung zur IEC/ISO 31010:2009; VDE Verlag und Beuth Verlag; Berlin.
- [DIN EN 61025:2007] Deutsche Fassung EN 61025:2007 (Deutsche Fassung zu IEC 61025:2006) (2007): Fehlzustandbaumanalyse; DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [DIN EN ISO 9000:2015] DIN EN ISO 9000:2015: Deutsches Institut für Normung e.V. ISO 9000:2015, Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe DIN EN ISO 9000. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [DIN ISO/TR 14121] DIN ISO/TR 14121-2:2013-02; DIN SPEC 33885:2013-02 (2013): Sicherheit von Maschinen-Risikobeurteilung-Teil 2: Praktischer Leitfaden und Verfahrensbeispiele; Beuth Verlag; Berlin.
- [Duden 2020] Duden (2020): „Analyse“;
<https://www.duden.de/rechtschreibung/Analyse>
Abrufdatum 11.03.2020.
- [Dumitrescu 2011] Dumitrescu, R. (2011): Entwicklungssystematik zur Integration kognitiver Funktionen in fortgeschrittene mechatronische Systeme; Dissertation; Paderborn.

- [Dumitrescu et al. 2015] Dumitrescu, R.; Anacker, T; Wetermann, T. (2015): Interdisziplinäre Anforderungen mit CONSENS managen; In: Technik in Bayern; Ausgabe 06/2015.
- [Dyckhoff und Spengler 2010] Dyckhoff, H.; Spengler, T.S. (2010): Produktionswirtschaft; Springer Verlag; Berlin.
- [Echterhoff 2016] O. Echterhoff (2016): Systematik zur Erarbeitung modellbasierter Entwicklungsaufträge; Dissertation; Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG; Paderborn.
- [Ehrlenspiel 2009] Ehrlenspiel, K. (2009): Integrierte Produktentwicklung; 4. Aufl. Hanser, München.
- [Ehrlenspiel und Meerkamm 2013] Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H. (2013): Integrierte Produktentwicklung-Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit; Carl Hanser Verlag; München. S. 748.
- [Eigner et al. 2014] Eigner, M.; Roubanov, D.; Zafirov, R. (2014): Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung. Springer Vieweg; Berlin, ISBN: 9783662438152.
- [Ellouze 2010] Ellouze, W. (2010): Entwicklung eines Modells für ein ganzheitliches Fehlermanagement. Ein Prozessorientiertes Referenzmodell zum effizienten Fehlermanagement. Dissertation, Shaker Verlag; Herzogenrath; ISBN 9783832290887.
- [Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik 2019] Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik Online Lexikon; <http://www.encyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/technologien-methoden/Sprache/Modellierungssprache>
Abrufdatum 20.06.2019.
- [Ericson 2005] Ericson, Clifton A. (2005): Hazard Analysis Techniques for System Safety; Wiley Verlag; Hoboken; ISBN 9780471720195.
- [Feldhusen et al. 2013] Feldhusen, J.; Grote, H.-K.; Nagarajah, A.; Pahl, G. (2013): Vorgehen bei einzelnen Schritten des Produktentstehungsprozesses; In: Pahl/ Beitz Konstruktionslehre, Feldhusen J. und Grote, H.-K. (Hrsg.); Springer Verlag; Berlin Heidelberg; S. 291-410.

- [Fokus online 2019] Fokus online 2019; https://www.focus.de/finanzen/boerse/157-menschenstarben-absturz-haette-verhindert-werden-koennen-tonaufnahme-bringt-boeing-in-erklaerungsnot_id_10717599.html
Abrufdatum 16.12.2019.
- [Friedenthal 2009] Friedenthal, S. (2009): SysML: Lessons from Early Applications and Future Directions. In: INCOSE Insight (Volume 12), S. 10-12.
- [Gabler Wirtschaftslexikon 2019] Online Gabler Wirtschaftslexikon (2019): „Intralogistik“. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/intralogistik-51702>
Abrufdatum 09.08.2019.
- [Gausemeier und Fink 1999] Gausemeier, J.; Fink, A. (1999): Führung im Wandel. Ein ganzheitliches Modell zur zukunftsorientierten Unternehmensgestaltung; Carl Hanser Verlag; München.
- [Gausemeier et al. 2008] Gausemeier, J.; Frank, U.; Donoth, J.; Kahl, S. (2008): Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme des Maschinenbaus; In: Konstruktion, Ausgabe 8/2008 und 9/2008; Springer VDI-Verlag; Düsseldorf.
- [Gausemeier et al. 2013] Gausemeier, J.; Dumitrescu, R.; Steffen, D.; Czaja, A.; Wiederkehr, O.; Tschirner, C. (2013): Systems Engineering in der industriellen Praxis (Studie); wentker Druck GmbH; Paderborn.
- [Geiger und Kotte 2008] Geiger, W. und Kotte, W. (2008): Handbuch Qualität; Vieweg & Sohn Verlag, GWV Fachverlage GmbH; Wiesbaden.
- [Gonschorek et al. 2009] Gonschorek, K.-H.; Vick, R. (2009): Electromagnetic Compatibility for Device Design and System Integration; Springer Heidelberg Dordrecht London New York; ISBN 9783642032899.
- [Haberfellner 2012] Haberfellner, R.; Fricke, E.; de Weck, O.; Vössner, S. (2012): Systems Engineering - Grundlagen und Anwendungen; Orell Füssli Verlag; Zürich. ISBN 9783280040683.

-
- [Haberfellner et al. 2015] R, Haberfellner; de Weck, O; Fricke, E.; Vössner, S. (2015): Systems Engineering-Grundlagen und Anwendungen; Orell füssli Verlag AG; Zürich.
- [Halang 2013] Halang, W. A. (2013): Funktionale Sicherheit; Springer-Verlag; Berlin, Heidelberg, ISBN 9783642413087.
- [Halang und Konakovsky 2018] Halang, W.A. und Konakovsky, R.M. (2018): Sicherheitsgerichtete Echtzeitsysteme; Springer Verlag; Berlin.
- [Häuslein 2004] Häuslein, A (2004): Systemanalyse: Grundlagen, Techniken, Notierungen. VDE-Verlag; Berlin, S. 29.
- [Hillenbrand 2012] Hillenbrand, M. (2012): Funktionale Sicherheit nach ISO 26262 in der Konzeptphase der Entwicklung von Elektrik / Elektronik Architekturen von Fahrzeugen; KIT Scientific Publishing; Karlsruhe; ISBN 9783866448032.
- [Hitchins 2007] Hitchins, D (2007): Systems Engineering - A 21st Century Systems Methodology; Wiley Verlag; Chichester, England.
- [Hollnagel 1998] Hollnagel, E. (Ed.) (1998): Cognitive Reliability and Error Analysis Method; Elsevier Science Ltd.; Oxford.
- [IEC 61025] IEC 61025:2006 (2006): Fault tree analysis (FTA) (Englische Fassung); VDE Verlag.
- [IEC 62059] IEC 62059-31-1:2008 (2008): -International Standard, Electricity metering equipment-Dependability-Part 31-1; Accelerated reliability testing – Elevated temperature and humidity; Elektrizitätszähler-Zuverlässigkeit -Teil 31-1: Zeitraffende Zuverlässigkeitsprüfung-Temperatur und Luftfeuchte erhöht (IEC 62059-31-1:2008); Deutsche Fassung EN 62059-31-1:2008.
- [IEC EN 61508] Norm IEC EN 61508 (2010): Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems, International Electrotechnical Commission; Part 1–7.
- [INCOSE 2015] INCOSE (2015): Systems engineering handbook – A guide for systems life cycle processes and activities; Wiley Verlag, Hoboken, New Jersey.

-
- [Isermann 2006] Isermann, R. (2006): Fault Diagnosis Systems – An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance.; Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, ISBN 9783540241126.
- [ISO 26262-1] Internationale Norm ISO 26262 (2011): Road vehicles - Functional Safety; Schweiz.
- [ISO/IEC 31010] ISO/IEC/FDSI 31010 (2009): Risk management-Risk assessment techniques; publiziert durch International Organization for Standardization (ISO) und International Electrotechnical Commission (IEC).
- [Jacobson 1987] Jacobson, I. (1987): Object-oriented development in an industrial environment. In: Norman Meyrowitz (Hrsg.): OOPSLA '87 conference proceedings. Object-oriented programming systems, languages and applications; New York, N.Y.: ACM (SIGPLAN notices spec. iss, 22, 12), S. 183–191.
- [Kamiske 2013] Kamiske, G. (2013): Handbuch QM-Methoden; Carl Hanser Verlag; München.
- [Kampker et al. 2013] Kampker, A.; Vallee, D.; Schnettler, A. (2013): Elektromobilität; Springer, Verlag; Berlin, Heidelberg; ISBN 9783642319853.
- [Kartika 2010] Kartika S., I. (2010): Methodik zur Analyse des Baukastenpotenzials bei bestehender Produktvielfalt. Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionsmethodik, Band 09.; Shaker Verlag; Aachen.
- [Klipper 2015] Klipper, S. (2015): Information Security Risk Management-Risikomanagement mit ISO/IEC 27001, 27005 und 31010; Vieweg Verlag, Springer Fachmedien; Wiesbaden.
- [Krishna 2008] Krishna, B. (2008): Handbook of Performability Engineering, Springer Verlag; London; ISBN 9781848001312.
- [Krumhauer 1974] Krumhauer, P. (1974): Rechnerunterstützung für die Konzeptphase der Konstruktion. Ein Beitrag zur Entwicklung eines Programmsystems für die Lösungsfindung konstruktiver Teilaufgaben; Dissertation; Berlin.

- [Lindemann 2005] Lindemann, U. (2005): Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden; Springer-Verlag; Berlin, Heidelberg.
- [Lindemann 2009] Lindemann, U.; Maurer, M.; Braun, T. (2009): Structural Complexity Management; Springer Verlag; Berlin, Heidelberg.
- [Lindemann und Ponn 2011] Lindemann, U.; Ponn, J. (2011): Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte; Springer Verlag; Berlin, Heidelberg.
- [Luhmann 1980] Luhmann, N (1980): Komplexität; In: Grochla, E. (Hrsg.): Enzyklopädie der Betriebswirtschaftslehre. 2., völlig neu gestaltete Aufl.; C.E. Poeschel Verlag; Stuttgart; S. 1064–1070.
- [Mamrot 2014] Mamrot, M (2014): Entwicklung eines Ansatzes zur modelbasierten Felddatenrückführung in die Produktentwicklung; Dissertation; Shaker Verlag, Aachen; ISBN 9783844029703.
- [Mamrot et al. 2015] Mamrot, M.; Schlüter, N.; Winzer, P. (2015): Wie können wir Qualität auch in der Zukunft sichern?; In: Bracke, S.; Mamrot, M.; Winzer, P. (Hrsg.), Qualitätsmethoden im Diskurs zwischen Wissenschaft und Praxis, Bericht zur GQW-Jahrestagung 2015 in Wuppertal; Band: 2015,17. Reihe: Berichte zum Qualitätsmanagement. ISBN 9783844033519; S.3 – 16.
- [Masing 2014] Masing, W.; Pfeifer, T.; Schmitt, R. (2014): Masing Handbuch Qualitätsmanagement, Hanser Verlag; München.
- [Maucher et al. 2002] Maucher, I.; Paul, H.; Rudolf, C. (2002): Modellierung in soziotechnischen Systemen. In: Desel, J.; Weske, M. (Hrsg.): Promise 2002. Prozessorientierte Methoden und Werkzeuge für die Entwicklung von Informationssystemen; Köllen Druck+Verlag GmbH; Potsdam, Bonn.
- [Meyna 2010] Meyna, A.; Pauli, B. (2010): Taschenbuch der Zuverlässigkeitstechnik. Quantitative Bewertungsverfahren; Carl Hanser Verlag; München, Wien; ISBN 9783446419667.

- [Muschik 2011] Muschik, S. (2011): Development of Systems of Objectives in Early Product Engineering, Entwicklung von Zielsystemen in der frühen Produktentstehung; Dissertation; Institut für Produktentwicklung (IPEK) Forschungsberichte, Karlsruhe.
- [Nicklas 2016] Nicklas, J.-P. G. (2016): Ansatz für ein modelbasiertes Anforderungsmanagement für Unternehmensnetzwerke; Dissertation; Shaker Verlag; Aachen.
- [Ott 2009] Ott, S. (2009): Konzept zur methodischen System-Modellierung in der Anforderungsgerechten Produktentwicklung; Dissertation; Shaker Verlag; Aachen; ISBN 9783832284725.
- [Parnell et al. 2011] Parnell, G. S.; Driscoll, P. J.; Henderson, D.L. (2011): Decision Making in Systems Engineering and Management; In: Sage, A.: Wiley Series in Systems Engineering and Management; John Wiley & Sons Verlag; New Jersey, Hoboken.
- [Ponn und Lindemann 2011] Ponn, J. und Lindemann, U. (2011): Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte; Springer Verlag; Berlin, Heidelberg.
- [Preiss 2009] Preiss, R. (2009): Methoden der Risikoanalyse in der Technik; TÜV Austria Verlag; Wien; ISBN: 9783901942099.
- [Reif 2012] Reif, K. (2012): Automobilelektronik, Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien; Wiesbaden.
- [Riekhof et al. 2012] Riekhof, F.; Winzer, P.; Wörner, L.; Kulig, S. (2012): Funktionsorientierte Auslegung eines Linearantriebs; In: Entwurf komplexer Automatisierungstechnik. EKA 2012;12. Fachtagung mit Tutorium und Toolausstellung. 09-10. Mai 2012 in Magdeburg, Denkfabrik im Wissenschaftshafen; Institut für Automation und Kommunikation e.V., Magdeburg; S. 121-138.
- [Riekhof et al. 2013] Riekhof, F.; Willing, M. (2013): Darlegung von Gestaltungsleitsätzen zur Systemmodellierung am Beispiel von K-VEC; In: Von der Produktentwicklung bis zur Business Excellence - Berichte zum Generic-Management Band 4/2013; Winzer, P (Hrsg.); Shaker Verlag; Aachen.

- [Rupp 2014] Rupp, C. (2014): Requirements-Engineering und -Management; Aus der Praxis von klassisch bis agil; Carl Hanser Verlag; München.
- [Sage und Rouse 1999] Sage, A. P.; Rouse, W. P. (1999): Handbook of Systems Engineering and Management; John Wiley & Sons Verlag; Canada; S. 437.
- [Salvatore et al. 2006] Salvatore, D; Liudong, X (2006): A New Approach to Modeling the System Reliability: Dynamic Reliability Block Diagrams; In: IEEE: Proceeding of the 6th Annual Reliability and Maintainability Symposium; Newport Beach, California, S. 189 – 195.
- [Scheeren 2014] Scheeren, I.; Pereira, C. E. (2014): Combining Model-Based Systems Engineering, Simulation and Domain Engineering in the Development of Industrial Automation Systems: Industrial Case Study. In: IEEE: Proceeding of the 17th International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC); USA; S. 40-47.
- [Schlund 2011] Schlund, S. (2011): Anforderungsaktualisierung in der Produktentwicklung. In: Berichte zum Generic-Management, Shaker Verlag; Aachen.
- [Schlüter et al. 2018] Schlüter, N.; Winzer, P.; Ansari, A.; Bielefeld, O.; Dransfeld, H.; Heinrichsmeyer, M. (2018): KAUSAL: A new methodological approach for model based analysis of complex failure chains by example of an electromobility concept; In: Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, IEEE, DOI 10.1109/SMC.2018.00168; S. 943-948.
- [Schlüter und Reiche 2019] Schlüter, N.; Reiche, M. (2019): Herausforderungen im Umgang mit Anforderungen in Zeiten des industriellen Wandels-Berichte zum Generic-Management; Band 1/2019; Shaker Verlag; Düren; S.172.
- [Schmalenbach 2013] Schmalenbach, H. H. (2013): Ontologien zum Bereitstellen von Gestaltungswissen am Beispiel von Ingenieurkeramik; Dissertation; Stolzenberger Druck und Werbung GmbH & Co. KG; Leimen.
- [Schneider 1996] Schnieder, J. (1996): Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen. Grundwissen für Ingenieure; vdf Hochschulverlag AG an der ETH; B.G. Teubner Verlag; Zürich; ISBN 3728121673.

- [Schnellbach 2016] Schnellbach, A. (2016): Komplexität ist ein Feind mit vielen Gesichter; In: Qualität und Zuverlässigkeit; Carl Hanser Verlag; Ausgabe 7; S. 11-13.
- [Schnieder 2013] Schnieder, E. (2013): Verkehrssicherheit; Springer Verlag; Berlin, Heidelberg.
- [Schröder 2016] Schröder, M. (2016): Klassifikation von Fehlerereignissen in produzierenden Unternehmen zur Erfüllung von Analysefunktionen im Anlauf; Dissertation; Apprimus Verlag; Aachen; ISBN 9783863594695.
- [Sequoia 2019] Sequoia Automation (2019); projektbezogene Unterlagen, bereitgestellt von Sequoia Automation; Italien; <http://www.sequoiaonline.com/>. Abgerufen am 18.06.2019.
- [Spath et al. 2000] Spath, D.; Dill, C.; Scharer, M. (2000): Unterstützung der Produktentstehung mit einem prozessbegleitenden Methodenbaukasten auf Intra/Internetbasis. In: VDI Berichte 1558; VDI Verlag; Düsseldorf.
- [Suh 1998] Suh, N. P. (1998): Axiomatic Design Theory for Systems; In: Research in Engineering Design, Volume 10, Issue 4. Springer Verlag, London.
- [Teseon 2018] Teseon (2018); <http://loomeo.com/>
Abrufdatum 07.12.18.
- [Tschirner 2016] Tschirner, C. (2016): Rahmenwerk zur Integration des modellbasierten Systems Engineering in die Produktentstehung mechatronischer Systeme; Dissertation; Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG; Münster.
- [VDA 2006] Verband der Automobilindustrie (2006): Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie- Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz (Band 4); VDA Verlag; Frankfurt.
- [VDA 3] Verband der Automobilindustrie (2000): VDA 3; Teil 1; Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie-Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten-Zuverlässigkeitsmanagement; VDA Verlag; Frankfurt.

- [VDI 4003:2007] Verein Deutscher Ingenieure (2007): VDI 4003-Zuverlässigkeitsmanagement, VDI-Handbuch Zuverlässigkeit, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [VDI 2221] Verein Deutscher Ingenieure (1993): VDI-Norm 2221-Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte; VDI Richtlinie; VDI Handbuch Konstruktion; Beuth Verlag; Berlin.
- [VDI 2206] Verein Deutscher Ingenieure (2004): VDI-Norm 2206-Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Beuth, Berlin.
- [Vesely und Stamatelatos 2002] Vesely, W. und Stamatelatos, M. (2002): Fault tree Handbook with Aerospace applications, Prepared for NASA Office of Safety and Mission Assurance; NASA Headquarters; Washington DC.
- [Weilkiens 2007] Weilkiens T. (2007): Systems engineering with SysML; Modeling, analysis, design; Morgan Kaufmann OMG Press/Elsevier; Amsterdam.
- [Weilkiens 2015] Weilkiens, T. (2015): SYSMOD - The Systems Modeling Toolbox-Pragmatic MBSE with SysML-Version 4.0. Fredesdorf: MBSE4U (MBSE4U Booklet Series), Tim Weilkiens Verlag.
- [Werdich 2012] Werdich, M. (2012): FMEA - Einführung und Moderation; Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien; Wiesbaden.
- [Westkämper 1997] Westkämper, E. (1997): Null –Fehler-Produktion in Prozessketten- Maßnahmen zur Fehlervermeidung und Kompensation; Springer Verlag; Berlin, Heidelberg.
- [Willing und Winzer 2015] Willing, M; Winzer, P. (2015): Fehler vermeiden heißt Fehler verstehen- Anforderungen an eine neue Methodik; In: Bracke S., Mamrot M., Winzer P. (Hrsg): Qualitätsmethoden im Diskurs zwischen Wissenschaft und Praxis; Bericht zur GQW-Jahrestagung 2015 in Wuppertal; Shaker Verlag; Herzogenrath, S. 303–320.
- [Winzer 1997] Winzer, P. (1997): Chancen zur umfassenden Unternehmensgestaltung. Methodischer Ansatz zur qualitäts-, human- und ökologieorientierten Gestaltung von Arbeits- und Fabrikssystemen; Habilitation; Peter Lang, Europäischer Verlag der Wissenschaften; Frankfurt.

- [Winzer und Sitte 2011] Winzer, P.; Sitte, J. (2011): Demand Compliant Design; Accepted for publication. In: IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics; Part A, Volume 41, No. 3.
- [Winzer 2014] Winzer, P. (2014): Trends zur Handhabung von Komplexität im Qualitätsingenieurwesen; Wissenschaftstag; Berichte zum Generic-Management, Bd. 2; Shaker Verlag; Aachen.
- [Winzer 2016] Winzer, P. (2016): Generic Systems Engineering-Ein methodischer Ansatz zur Komplexitätsbewältigung; Springer Vieweg Verlag; Berlin, Heidelberg; ISBN 9783642303654.
- [Wörner 2013] Wörner, L. (2013): Ein heuristisches Verfahren zum automatisierten Eingrenzen des Lösungsraumes in frühen Phasen der Produktentwicklung, TdW, Wuppertal.
- [Wörner et al. 2014] Wörner, L; Kulig, M.; Willing, M.; Winzer, P. (2014): Genetic algorithm embedded into a quality-oriented workflow of methods for the development of a linear drive used in intralogistic systems, in: Archives of electrical engineering, Vol. 63(4), S. 647-665.
- [Zhang 2005] Zhang WJ, Lin Y, Sinha N (2005): A note on function-behaviour-structure framework for design. Journal of Design Research; The 2. Canadian Design Engineering Network (CDEN); International conference on design education, innovation and practice; July 18–20, Alberta Canada.
- [Zingel 2013] Zingel, J. (2013): Basisdefinition einer gemeinsamen Sprache der Produktentwicklung im Kontext der Modellbildung technischer Systeme und einer Modellierungstechnik für Zielsystem und Objektsystem technischer Systeme in SysML auf Grundlage des ZHO-Prinzips; Dissertation; Forschungsberichte Institut für Produktentwicklung (IPEK); Band 70; Karlsruhe.

Anhang

Anhang A: Tabelle mit standardisierten Beschreibungen und Notationen von DeCoDe-Systemelementen, Relationen und Attributen

Tabelle 23: Standardisierte Beschreibung und Notationen von DeCoDe-Systemelementen, Relationen und Attributen (Eigene Darstellung in Anlehnung an [Nicklas 2016; Mamrot 2014, Riekhof et al. 2013, Schlund 2011, Ott 2009])

DeCoDe-Systemelemente (mit Symbolen) und Relationen (Beziehungen)	Beschreibung/Attribute/ Merkmale/ Parameter
Arten von Sichten	
 Anforderungen	<p>Unterteilung der Anforderungen nach Kategorien:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sicherheitsanforderungen • Funktionale Anforderungen • Nicht funktionale Anforderungen (z. B. Gesetze und Normen) • Umweltaforderungen (Anforderungen aus dem Umfeld des Systems) • Ereignisrelevante Anforderungen • Sonstige, spezifische Anforderungen <p>Unterteilung der Anforderungen nach Attributen [Nicklas 2016, S. 72]:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pflichtattribute • Wahlattribute • Freiwählbare Attribute, diese werden genutzt für eine detaillierte Beschreibung
 Funktionen	<p>Arten von Funktionen [Feldhusen et al. 2013, S. 245]:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hauptfunktionen • Nebenfunktionen <p>Beschreibung von Funktionen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Elementarfunktionen nach [Ehrlenspiel 2009; Kartika 2010; Krumhauer 1974]: <ul style="list-style-type: none"> ○ Ein- und Ausgangszustand ○ Relationen ○ Operationen • Substantiv + Verb Modell (z. B. Energie wandeln) nach [Zhang 2005]

Fortsetzung Tabelle 23

DeCoDe-Systemelemente (mit Symbolen) und Relationen (Beziehungen)	Beschreibung/Attribute/ Merkmale/ Parameter
Arten von Sichten	
 Prozesse	Attribuierung von Prozessen nach [Spath et al. 2000; Bertsche 2004; Kamiske 2013; VDI 4003:2007]: <ul style="list-style-type: none"> • Art von Prozessen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Produktionsprozess ○ Fertigungsprozess ○ Nutzungsprozess (Use-case) • Struktur/ Zeitlich-logische Vernetzung von Prozessen: <ul style="list-style-type: none"> ○ seriell ○ parallel • Ort von Prozessen [Mamrot 2014, S. 54]: <ul style="list-style-type: none"> ○ Interne Prozesse ○ externe Prozesse • Systemprozess und Anwendungsprozess nach [Halang und Konakovsky 2018, S. 676]
 Komponenten	Attribute von Komponenten [nach Feldhusen et al. 2013]: <ul style="list-style-type: none"> • Material • Gewicht • Dimension • Mechanik • usw.

Fortsetzung Tabelle 23

DeCoDe-Systemelemente (mit Symbolen) und Relationen (Beziehungen)	Beschreibung/Attribute/ Merkmale/ Parameter
Arten von Relationen: Relationen innerhalb einer Sicht (Sichtenintern; Domänenintern)	
Anforderungen-Anforderungen Matrix (A-A Matrix oder A-A Relation)	
A-A Relation in Bezug auf die Hierarchie/Struktur	A (x) ist Bestandteil von A (x)
A-A Relation in Bezug auf Wichtigkeit/Gewichtung	A (x) ist wichtiger als A (x), nach [Ott 2009]
A-A Relation in Bezug auf die Beeinflussung/Korrelation	A(x) beeinflusst/korreliert mit A (x)
A-A Relation in Bezug auf gleiche oder identische Anforderungen.	A (x) ist identisch mit A (x)
A-A Relation in Bezug auf Widerspruch zwischen Anforderungen	A (x) widerspricht A (x)
Funktionen-Funktionen Matrix (F-F Matrix oder F-F Relation)	
F-F Relation in Bezug auf das Verhältnis zwischen Funktionen	F (x) liefert Input für F (x)
F-F Relation in Bezug auf die Beziehung zwischen den nützlichen und schädlichen Funktionen	F (nützlich oder notwendig) verursacht F (nützlich oder schädlich), nach [Lindemann und Ponn 2011, S. 339]
F-F Relation in Bezug auf die gegenseitige Beeinflussung	F (x) beeinflusst F (x)
Prozesse-Prozesse Matrix (P-P Matrix oder P-P Relation)	
P-P Relation in Bezug auf die Hierarchie/Struktur	P (x) ist Bestandteil von P (X)
P-P Relation in Bezug auf das Verhältnis zwischen Prozessen	P (x) liefert Input nach P(x)
P-P Relation in Bezug auf die gegenseitige Beeinflussung	P (x) beeinflusst P (x)

Fortsetzung Tabelle 23

DeCoDe-Systemelemente (mit Symbolen) und Relationen (Beziehungen)	Beschreibung/Attribute/ Merkmale/ Parameter
Arten von Relationen: Relationen innerhalb einer Sicht (Sichtenintern; Domänenintern)	
Komponente-Komponente Matrix (K-K Matrix oder K-K Relation)	
K-K Relation in Bezug auf die Hierarchie/Struktur/Produktstruktur	K (x) ist Bestandteil von K (x)
K-K Matrix: Flüsse (Energie, Stoff und Signal bzw. Information) zwischen Komponenten	
K-K Relation in Bezug auf die Energie Flüsse (elektrisch)	K (x) überträgt/leitet elektr. Energie nach K (x)
K-K Relation in Bezug auf die pneumatischen Flüsse, (Druckluft)	K (x) überträgt/ leitet Druckluft nach K (x)
K-K Relation in Bezug auf die Informationsflüsse (Daten oder Signale)	K (x) überträgt/ leitet Daten nach K (x)
K-K Relation in Bezug auf die Kräfteübertragung (Energie-transfer mechanisch)	K (x) überträgt/ leitet Kraft (x) nach K (x)
K-K Relation in Bezug auf die thermischen Flüsse	K(x) überträgt/ leitet Wärme nach K(x)
K-K Matrix: Örtlicher Bezug zwischen Komponenten	
K-K Relation in Bezug auf den Kontakt zwischen Komponenten	K (x) hat einen Kontakt mit K (x)
K-K Relation in Bezug auf den Abstand (Entfernung) zwischen Komponenten	K (x) ist xx m/cm/mm entfernt von K (x)
K-K Matrix: Ausfall (kaskadierend)	
K-K Relation in Bezug auf die Kausalkette eines Ausfalls	K (x) verursacht Ausfall an K (x)

Fortsetzung Tabelle 23

DeCoDe-Systemelemente (mit Symbolen) und Relationen (Beziehungen)	Beschreibung/Attribute/ Merkmale/ Parameter
Arten von Relationen: Relationen zwischen zwei (PSM-) Sichten (Sichtenübergreifend; Domänenübergreifend)	
K-F Relation in Bezug auf die Realisierung	K(x) realisiert F(x)
F-K in Bezug auf die Übertragung (Input)	F(x) überträgt Input [...] nach, wobei [...] für Freitext steht
P-K Relation in Bezug auf die Nutzung	P (x) nutzt K (x)
K-A Relation in Bezug auf die Realisierung	K (x) realisiert A (x) indirekt
P-A Relation in Bezug auf die Erfüllung	P (x) erfüllt A(x) indirekt
F-P Relation in Bezug auf die Realisierung	F (x) realisiert P(x)
F-A Relation in Bezug auf die Erfüllung	F (x) erfüllt A (x)
Relationen zwischen dem PSM und den Effekten	
F-Effekt bzw. K-Effekt Relation in Bezug auf die Auflösung	[F, K] löst [Effekt] aus
Effekt-F bzw. Effekt-K Relation in Bezug auf die gegenseitige Beeinflussung	Effekt-F bewirkt ungewollt [...] nach Effekt-K
Effekt-F bzw. Effekt-K Relation in Bezug auf Störung	Effekt-F bewirkt eine Störung an der K (x)
Effekt-F bzw. Effekt-K Relation in Bezug auf einen Ausfall	Effekt-F bewirkt Ausfall an der K (x)
Relationen zwischen dem PSM und den Umweltfaktoren (U)	
F/K-U Relationen in Bezug auf die gegenseitige Beeinflussung	F/ K beeinflusst U [...], wobei [...] für Freitext steht (z. B. Umweltfaktor Temperatur)
U [...] - F/K Relation in Bezug auf die gegenseitige Beeinflussung	U [...] beeinflusst F/K (x)
Relationen zwischen den Umweltfaktoren (U) und den Effekten (E)	
U-E Relation in Bezug auf die gegenseitige Beeinflussung	U (x) beeinflusst E (x)
E-U Relation in Bezug auf die gegenseitige Beeinflussung	E (x) beeinflusst U (x)

Anhang B: Methoden der Fehleranalyse

FMEA

Die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) ist eine genormte und formalisierte Methode zur Analyse und Erfassung von potentiellen, möglichen Fehlern sowie deren Auswirkungen auf die Komponenten, Bauteile oder Subsysteme. Das Ziel der Methode ist die frühzeitige Fehler- bzw. Risikovermeidung in der Produktionsphase (Prozess-FMEA) oder in der Nutzungsphase (Design- oder Produkt-FMEA) [DIN EN 60812:2006; Kamiske 2013, S. 701 ff.] Die erweiterte Methode der FMEA wird FMECA genannt (engl. Failure Mode and Effects and Criticality Analysis) und hat den Fokus auf kritische Komponenten sowie deren möglichen Ausfällen in einem technischen System [Isermann 2006; Hollnagel 1998].

Entwickelt wurde die FMEA bereits in den 60er-Jahren im Rahmen eines Raumfahrtprogramms der NASA. Ab den 80er-Jahren wurde FMEA in weiteren industriellen Einsatzbereichen (Kernenergie bis hin zu der Automobilindustrie) angewendet. In den letzten Jahren hat sich diese Methode insbesondere in der Automobilindustrie stark etabliert. Gegenwärtig wird die FMEA nach dem Automotiv Industry Action Group (AIAG) und dem Verband der Automobilindustrie (VDA) am meisten genutzt [vgl. AIAG und VDA 2019]. Prinzipiell wird zwischen zwei Arten der FMEA unterschieden: Design-FMEA (DFMEA) und Prozess-FMEA (PFMEA). Obwohl sich die zwei Arten der FMEA hinsichtlich des Betrachtungsgegenstands differenzieren (Produkt bei DFMEA und Prozess bei PFMEA), bleibt die Vorgehensweise zur Erstellung der FMEA für beide identisch. Die Vorgehensweise besteht aus sieben Schritten (vgl. Abbildung 62).

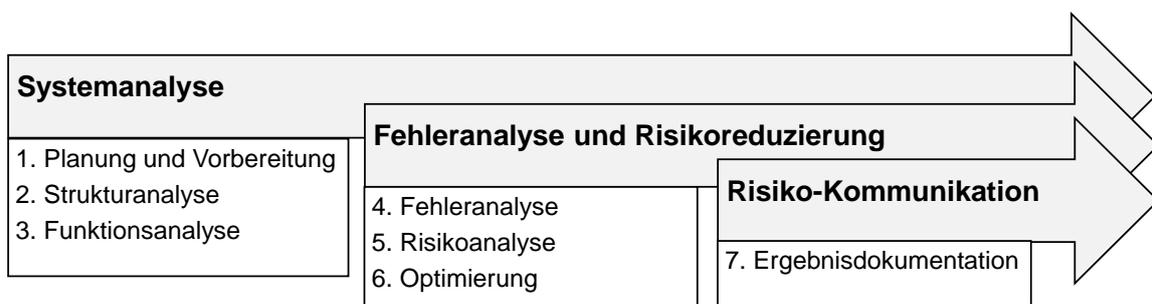


Abbildung 62: Vorgehensweise zur Erstellung einer FMEA (Produkt und Prozess) [in Anlehnung an AIAG und VDA 2019]

Allgemein unterteilt sich die Vorgehensweise zur Erstellung der FMEA in drei Bereiche: Systemanalyse (Schritte 1,2 und 3), Fehleranalyse und Risikoreduzierung (Schritte 4,5 und 6), sowie Risiko-Kommunikation (Schritt 7). Die Systemanalyse beginnt mit der Planung und Vorbereitung (Schritt 1). Daraufhin wird der Strukturbaum (Komponentenstruktur) durch die Strukturanalyse (Schritt 2) erstellt, woraus die Funktionen abgeleitet und analysiert werden (Schritt 3). Bei der Fehleranalyse

(Schritt 4) werden mögliche Fehlerfolgen, Fehlerarten und Fehlerursachen identifiziert und beschrieben. Nach der Identifikation von Fehlern, werden diese bei der Risikoanalyse (Schritt 5) durch die Aufgabenpriorität (AP), welche sich aus der Bedeutung, dem Auftreten und der Entdeckung des Fehlers ergibt, bewertet und priorisiert. Die AP löst somit die bisher bekannte Risikoprioritätszahl (RPZ) bei der FMEA ab. Basierend auf der AP-Bewertung werden Vermeidungsmaßnahmen erarbeitet (Schritt 5). Als nächstes werden für die Umsetzung der Maßnahmen Verantwortlichkeit und Terminierung festgelegt, um das Produktsystem (oder den Prozess) zu optimieren (Schritt 6). Abschließend werden die Ergebnisse kommuniziert und dokumentiert (Schritt 7).

Für industrielle Anwendung der FMEA werden unterschiedliche Software-Tools (vgl. APIS IQ Software oder Plato) genutzt. Die Struktur der Softwaretools basiert meistens auf der in der Abbildung 62 vorgestellten Vorgehensweise zur Erstellung der FMEA. Obwohl die Methode in vielen Unternehmen angewendet wird (z. B. für die Reduzierung von Fehlkosten durch frühzeitige Fehlervermeidung), beinhaltet sie einige „Schwachstellen“.

Insbesondere bei den mechatronischen Systemen gestaltet sich die Anwendung der Methode aufgrund der Erfassung unterschiedlicher Disziplinen sehr schwierig. Des Weiteren ist es durch die stringente Vorgabe anhand des FMEA-Formblattes nur möglich, die Auswirkung einzelner Fehler zu betrachten, dabei werden Fehlerkombinationen, Wechselwirkungen und Beziehungen sowie Abhängigkeiten nicht beachtet [Preiss 2009], [DIN EN 60812]. In Tabelle 24 werden weitere Nachteile der FMEA erläutert. Aus diesen werden Anforderungen an MemogaFA abgeleitet. Zusätzlich dazu wurde in der Fachliteratur analysiert, wie der Begriff „Fehler“ für die FMEA definiert oder verwendet wird, um den Bezug zu der dritten Forschungslücke aus der Problemstellung dieser Arbeit herzustellen. Des Weiteren ist es wichtig, für eine systematische Kopplung zwischen den MdF und einem Systemmodell, die In- und Outputs für diese Methode zu untersuchen (Eingangs- und Ausgangsinformationen). Zusammengefasst liefert die Tabelle 24 die Erkenntnisse aus der Literaturanalyse zur FMEA unterteilt in sechs Aspekte der Untersuchung (In- und Outputs, Definitionen von Fehlern, Vor- und Nachteile sowie die aus den Nachteilen resultierenden Anforderungen an MemogaFa).

Tabelle 24: Zusammengefasste Erkenntnisse zur FMEA und Ableitungen der Anforderungen an die zu entwickelnde MemogaFa [in Anlehnung an Preiss 2009, DIN EN 60812, Klipper 2015, DIN EN 31010, ISO/IEC 31010, Kamiske 2013, Schnieder 2013]

Input	<ul style="list-style-type: none"> • Daten über die Elemente (z. B. Bauelement in der Komponentenebene) des zu untersuchenden Systems, • Zeichnungsunterlagen oder Flussdiagramme, • Verständnis über Funktionen, Prozessschritte und Komponenten in einem System, • Einzelheiten über Umweltparameter, die Einfluss auf das System ausüben, • Informationen über Arten, wie ein System ausfallen kann, • theoretische und tatsächliche Fehlerzustände, • Erfahrungsberichte über Ausfälle oder Daten über die Ausfallraten (wenn vorhanden) und bereits durchgeführten FMEAs, die einen Bezug zu dem zu untersuchenden System haben.
Output	<ul style="list-style-type: none"> • Liste von Ausfallraten bzw. Fehlerzuständen, • Qualitative Bewertungen hinsichtlich der Eintrittswahrscheinlichkeiten und Auswirkungen einzelner Fehler oder „Failure Modes“ (auch eine quantitative Bewertung ist möglich, wenn Daten vorhanden), • Identifikation von Auswirkungen von Ausfallarten und Ausfallmechanismen auf Komponentenebenen, in den Prozessschritten oder auf Gesamtsystemebene und • Einstufung und Priorisierung der Erkenntnisse aus der Analyse nach der Wahrscheinlichkeit eines Personenschadens oder Systemausfalls (Dieser Aspekt ist nach der neuen Harmonisierung der FMEA und der Ersetzung der RPZ durch AP (Aufgabepriorität) von großer Bedeutung bei der Anwendung der FMEA)
Definition von Fehlern	Es gibt keine konkrete Definition von Fehlern, stattdessen wird der Begriff „Fehlerzustand“ verwendet.
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Identifikation von potentiellen Ausfallraten von unterschiedlichen Teilsystemen in einem System, • ermöglicht eine präventive Qualitätssicherung und erhöht die qualitätssichernden Maßnahmen, weit verbreitet und international standardisiert, • verhältnismäßig kostengünstig, • Reduzierung von Fehlkosten durch frühzeitige Fehlerentdeckung und Fehlervermeidung, • Reduzierung von Fehlern in der PE, Fertigung und Produktion (Prozess-FMEA) sowie bei der Nutzung von Produkten und • Förderung und Verbesserung der Kommunikation und Zusammenarbeit zwischen unterschiedlichen Bereichen im Unternehmen.
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Nicht geeignet, um Zusammenhänge zwischen mehreren Ausfallmöglichkeiten zu erkennen, • Es werden nur Einfachfehler betrachtet, somit werden Fehlerkombinationen, Wechselwirkung und Beziehungen sowie Abhängigkeiten nicht identifiziert, • Anwendung von FMEA für komplexe und mechatronische Systemen auch unter Nutzung verschiedener Softwarelösungen ist sehr schwierig und • im Vergleich zu anderen Verfahren (z. B. FTA) eher unsystematisch.
Abgeleitete Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • MemogaFa soll nicht nur Einfachfehler, sondern auch Fehlerkombinationen, Wechselwirkungen und Beziehungen sowie Abhängigkeiten identifizieren, • MemogaFa soll auch für mechatronischen Systemen anwendbar sein, • MemogaFa soll systematisch sein und • MemogaFa soll das Fehlerrisiko ermitteln.

Ishikawa (Ursache-Wirkungs-Analyse)

Die Ursache-Wirkungs-Analyse stellt mögliche Ursachen oder Ursachen-Kategorien, welche eine unerwünschte Wirkung oder ein Problem erzeugen, strukturiert dar. Dafür wird das nach seinen Begründern genannte „Ishikawa-Diagramms“ angewendet. Das Diagramm wird aufgrund der strukturellen Anordnung auch als „Fischgräten-Diagramm“ bezeichnet [DIN EN 31010; ISO IEC 31010, Kamiske 2013]. Die Methode beginnt mit der Definition des zu untersuchenden Problems (Wirkung). Daraufhin werden unterschiedliche Ursachen zum Problem einzeln ermittelt (vgl. Abbildung 63). Dabei werden die Ursachen in Kategorien unterteilt (Maschine, Mensch, Mitwelt/ Milieu und Methode, Messungen und Material) [VDA 2006, Kamiske 2013].

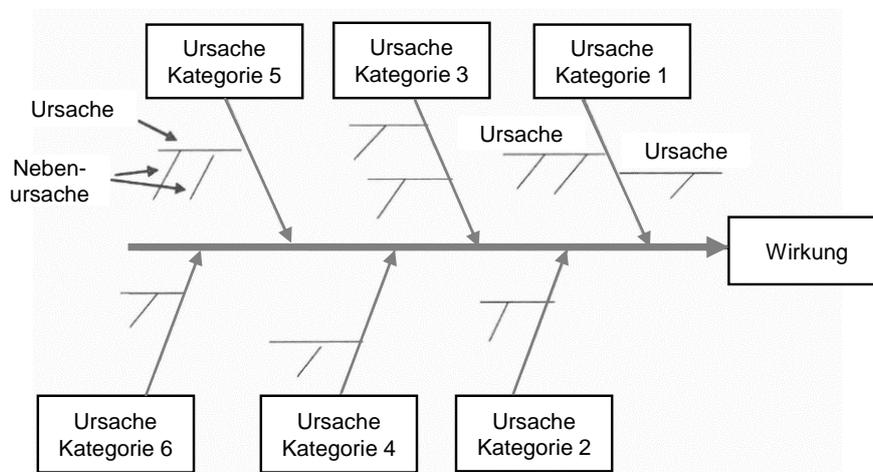


Abbildung 63: Diagramm zur Ursache-Wirkungs-Analyse (Ishikawa) [in Anlehnung an DIN EN 31010]

Auch für diese qualitative Methode ist Expertenwissen notwendig, denn ein Team bestimmt detailliert alle möglichen Ursachen, die zu einem Problem oder Fehler führen können.

Bei der Anwendung der Methode hat sich die Frage „Warum?“ als nützlich erwiesen, um Ursachen sukzessive zu identifizieren. Es wird so oft „Warum“ gefragt bis über unterschiedlichen „Verzweigungen“, die konkrete Ursache ermittelt wird [Werdich 2012]. Ishikawa kann auch als unterstützende Methode für FMEA genutzt werden [Werdich 2012; VDA 2006]. Ferner wurde diese Methode mit dem (DeCoDe-)Systemmodell erfolgreich kombiniert [vgl. Mamrot 2014].

Für die systematische Vernetzung mit einem Systemmodell liefert Tabelle 25 wichtige Informationen hinsichtlich der In- und Outputs der Methode. Abschließend werden aus den Nachteilen Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik hergeleitet.

Tabelle 25: Zusammengefasste Ergebnisse zu Ishikawa und Ableitungen der Anforderungen an MemogaFa [in Anlehnung Klipper 2015, DIN EN 31010, ISO/IEC 31010, Kamiske 2013]

Input	<ul style="list-style-type: none"> • Allgemeine Informationen auf welche Art ein System nicht funktionieren kann und Fehlerzustände, • Analyseergebnisse z. B. aus anderen Methoden (wie z. B. Ursachen aus FTA) und • Generierte Szenarien (z. B. Use-Case Szenarien).
Output	<ul style="list-style-type: none"> • Graphische Darstellung Fischgräten-Diagramm oder Baumdarstellung von Ursache- (Haupt-) Kategorien zu einem definierten Problem, • Erkenntnisse über die Kausalität von Fehlern (Welche Ursachen bzw. Ursache-Kategorie führen zu der Auswirkung oder Effekt) und • Strukturierte Darstellungen von Ursachen zu einem Problem (Auswirkung oder Effekt).
Definition von Fehlern	<ul style="list-style-type: none"> • Nicht vorhanden.
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Fördert die Zusammenarbeit in interdisziplinärem Team, • Einfach und leicht anzuwenden, • Erhöht das Verständnis von Fehlerursachen und • Mehrere Analyseergebnisse können zusammengefasst und übersichtlich im sogenannten „Fischgrätendiagramm“ dargestellt werden.
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Ursachen werden nicht in Kombination betrachtet, • Wechselwirkungen werden nicht gezeigt, • Bedingte Aussagekraft, wenn Ishikawa als einzelne, „isolierte“ Methode angewendet wird und • Es erfolgt keine Ermittlung des Fehlerrisikos.
Abgeleitete Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • MemogaFa soll Kombinationen von Ursachen betrachten können und • MemogaFa soll Wechselwirkungen darstellen und analysieren können.

Fehlerbaumanalyse (FTA), Ereignisbaumanalyse (ETA) und Bow-Tie Methode

Die Methoden Fehlerbaumanalyse (FTA), Ereignisbaumanalyse (ETA) und die Bow-Tie sind miteinander verzahnt und werden aus diesem Grund zusammen betrachtet. FTA ist eine der wichtigsten Methoden aus der Zuverlässigkeitstechnik und hat den Schwerpunkt auf der systematischen Analyse. Die Anwendung erfolgt vor allem bei sicherheitsrelevanten Bauteilen und Systemen unter Berücksichtigung aller möglichen Ausfälle oder Ausfallkombinationen (Ursachen), die zu einem festgelegten Ereignis (Top-event) führen können [Bertsche et al. 2016, Preiss 2009, Brückner 2013, DIN EN 61025:2007]. Dabei werden die Ursachen (Basisereignisse) eines Fehlers bzw. Top-Events anhand der Booleschen Algebra logisch miteinander verknüpft und als Fehlerbaum abgebildet [Klipper 2015], wie in der Abbildung 64 illustriert.

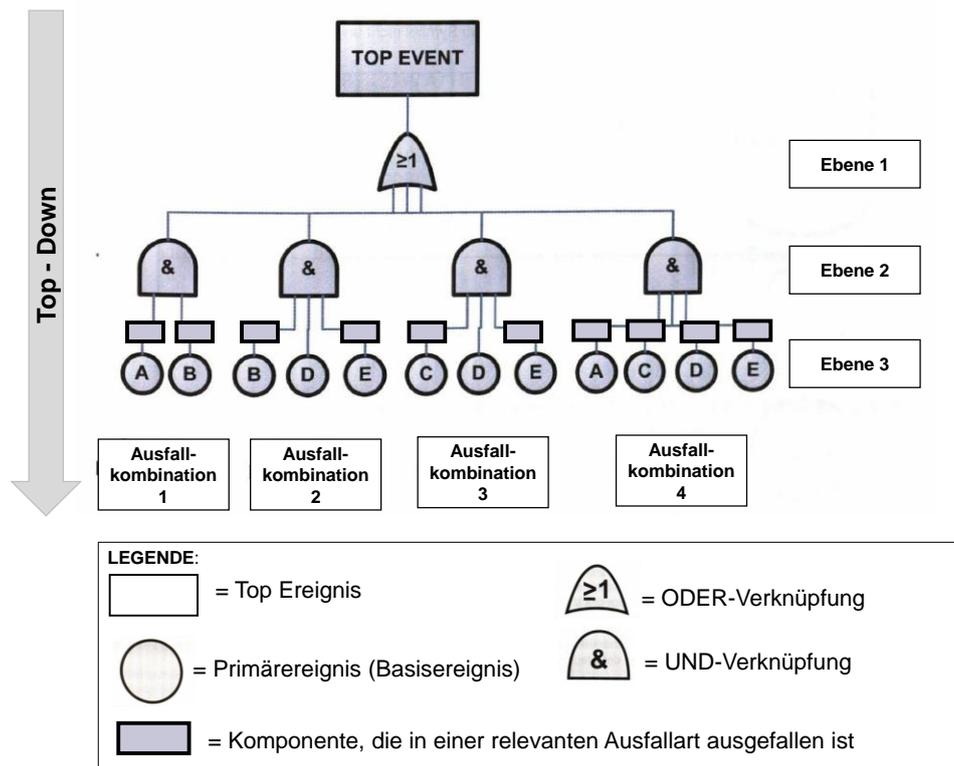


Abbildung 64: Darstellungsform der FTA mit Bezug auf Systemebenen [in Anlehnung an Preiss 2009, S. 79 und DIN 61025, S. 20]

Da die FTA nach dem Top-Down-Prinzip erstellt wird, kann sie als eine deduktive Methode bezeichnet werden [Bertsche et al 2016, Preiss 2009, Brückner 2013, DIN EN 61025:2007]. FTA kann sowohl qualitativ (z. B. auf Basis vom Expertenwissen) als auch quantitativ durchgeführt werden. Aus den relevanten Ausfallarten oder Fehlerarten ergeben sich Ausfallkombinationen, die zu einem Systemausfall führen können [DIN EN 61025; Geiger 2008]. Das „Gegenstück“ der FTA ist die Ereignisbaumanalyse (ETA), womit mögliche Konsequenzen, die sich aus dem Top-Ereignis ergeben, analysiert werden können. In diesem Fall ist das unerwünschte Top-Ereignis der Ausgangspunkt und Auslöser [Schnieder 2013]. Die Folgen und Auswirkungen auf das Gesamtsystem werden anhand einer binären Vorgehensweise („ja/ nein“ bzw. „kein Fehler/Fehler“) systematisch untersucht [Klipper 2011, S. 141]. Dabei soll identifiziert werden, ob das Ereignis zwangsläufig zu einem Schadensereignis führt „oder aber das Schadensausmaß mittels der im System-Design implementierten Sicherungsmaßnahmen und -prozeduren reduziert bzw. sogar verhindert werden kann“ [Schnieder 2013, S. 322]. Die Maßnahmen, oder sogenannte Barriere, sollen präventiv die Auswirkungen mindern oder beseitigen. Diese „Barriere“ sind auch bei der Bow-Tie Methode (die Kombination aus FTA und ETA) vorhanden und bilden wichtige Bestandteile der Methode. Bow-Tie ist ursprünglich aus dem Risikomanagement bei Shell entstanden [Preiss 2009]. Die Durchführung der Methode beginnt, vergleichbar mit FTA und ETA, indem das Top-Event (Ereignis) definiert wird. Danach werden die Ursachen und die potentiellen Gefährdungen ermittelt, welche zum Ereignis führen können (linke Seite

des Bow-Tie Diagramms, vgl. Abbildung 65). Komplementär dazu wird mithilfe des ETA Diagramms (rechten Seite des Bow-Tie Diagramms, vgl. Abbildung 65) mögliche Folgeereignisse analysiert. Aus den Folgeereignissen (auch Wirkungen) resultieren Konsequenzen, welche durch abmildernde Maßnahmen reduziert oder beseitigt werden sollen.

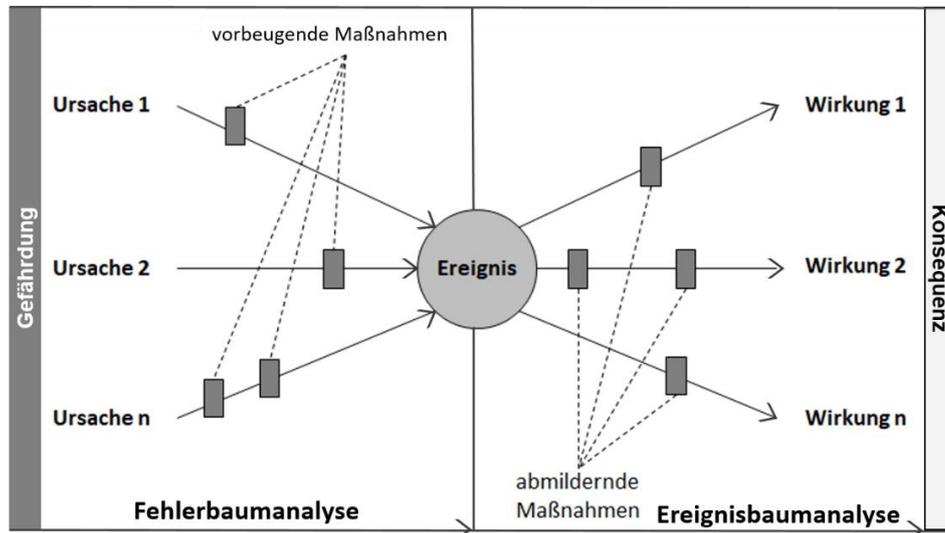


Abbildung 65: Das Bow-Tie Diagramm [in Anlehnung an Klipper, 2015, S. 145; DIN EN 31010, S. 64; Schneider 1996, S. 119 und Preiss 2009, S. 102]

Im Allgemeinen setzt sich Bow Tie aus sieben Elementen zusammen (vgl. Abbildung 65):

- Gefährdung,
- Ursache,
- vorbeugende Maßnahmen,
- Ereignis oder Top-Event,
- abmildernde Maßnahmen,
- Wirkungen und
- Konsequenzen.

Die Besonderheit und Stärke der Methode ist die gezielte Herleitung von präventiven Maßnahmen, um mögliche Schäden zu reduzieren oder zu eliminieren. Die Maßnahmen unterscheiden sich in vorbeugende und abmildernde Maßnahmen. Vorbeugende Maßnahmen sollen verhindern, dass bereits vorhandene Ursachen nicht zum unerwünschten Ereignis führen, während die abmildernden Maßnahmen die Konsequenzen nach dem Eintritt des Ereignisses reduzieren sollen. Das Bow-Tie Diagramm kann bei komplexen Szenarien sehr unübersichtlich sein. Das Weiter kann mit Bow-Tie jeweils nur ein Ereignis analysiert werden. Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Pfaden werden zudem nicht berücksichtigt [Schnieder 2013; Klipper 2015].

Dennoch bietet die Bow-Tie Methode Vorteile aus zwei bekannten Methoden (ETA und FTA) und hilft durch die Erarbeitung und Umsetzung von vorbeugenden und abmildernden Maßnahmen negative Konsequenzen (Personenschaden, Fehlerkosten) zu vermeiden. In Tabelle 26 werden alle drei Methoden (FTA, ETA und Bow Tie) zusammengefasst analysiert.

Tabelle 26: Zusammengefasste Erkenntnisse zu FTA, ETA und Bow-Tie und Ableitungen der Anforderungen an MemogaFa [in Anlehnung an Preiss 2009, Klipper 2015, DIN EN 31010; ISO/IEC 31010, Kamiske 2013, Schnieder 2013, DIN 25424]

Input	<ul style="list-style-type: none"> • Systemanalyse sowie Systemfunktionen des technischen Systems, • Komponenten, • Informationen über Arten, wie das System nicht funktionieren kann, • theoretische und tatsächliche (z. B. aus vergangenen Ursachenanalysen) Daten über die Fehlerzustände des Systems, • Informationen über Ausfallwahrscheinlichkeit und Ausfallraten, • detaillierte Diagramme und • Kenntnisse über die Komponenten und Funktionen des zu untersuchenden Systems.
Output	<ul style="list-style-type: none"> • Flussdiagrammähnliche graphische Darstellungen mit relevanten Top-Ereignissen, • die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Top-Ereignisses, wenn quantitative Daten vorhanden sind und • graphische Visualisierung von Abhängigkeiten und Zusammenhängen von Komponenten und Funktionen mit dem Fokus auf Ursache und Wirkungen, auch mit Maßnahmen, die als Barrieren in der Darstellung auftauchen (bei der Bow-Tie Methode).
Definition von Fehlern	„Failures are basic abnormal occurrences, whereas faults are “higher order” or more general events” [Vesely und Stamatelatos 2002, S. 26].
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Übersichtliche Darstellung der Ausfallkombinationen eines Systems, • sehr strukturierter, methodischer Ansatz, • verhältnismäßig einfach zu erlernen, anzuwenden und zu verstehen, • international standardisiert (vgl. DIN EN 61025), • detaillierte Zusammenhängen aus der graphischen Darstellung ermöglichen Rückschlüsse auf konzeptionelle Defizite, • komplexe Zusammenhänge werden übersichtlich und verständlich abgebildet, • nützlich für die Betrachtung unterschiedlicher Schnittstellen in einem System und • quantitative und qualitative Resultate.
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Die Durchführung der Methode wird mit zunehmender Größe des Fehlerbaums schwieriger, • die Komplexität eines Fehlers- bzw. Ereignisbaums ist abhängig von der Systemgröße, dabei entsteht die Gefahr, dass die Komplexität eines Sachverhalts und die Wechselwirkungen nicht ausreichend dargestellt werden, • für jeden Fehler (Top-Event) wird einen Fehlerbaum benötigt, • die Identifikation aller Ursachen-Wirkungen Beziehungen ist nicht möglich, • ein Fehlerbaum ist ein statisches Modell, folglich zeitliche Abhängigkeiten werden nicht erfasst und • Fehlerzustände werden nur binär aufgefasst (ausgefallen oder nicht ausgefallen).
Abgeleitete Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • MemogaFa soll die Wechselwirkungen unterschiedlicher Systemelemente auch bei einem komplexen System transparent darstellen, • MemogaFa soll Ursache-Wirkungs-Beziehungen identifizieren und • MemogaFa soll zeitliche Abhängigkeiten im Systemmodell darstellen bzw. erfassen.

RBD (Reliability block diagram)

Das Reliability block diagram (RBD) (Deutsch: Zuverlässigkeitsblockdiagramm) ist eine bekannte und etablierte Methode in der Zuverlässigkeitstechnik und Sicherheitsanalyse [DIN 61078, Liggesmeyer 2000]. Der zentrale Aspekt der Methode ist die grafische Darstellung von Komponenten eines Sub- oder Teilsystems, welche oft als „Kästchen“ dargestellt werden, mit dem Ziel, die Funktionsfähigkeit des Systems zu untersuchen [Salvatore et al. 2006; Meyna 2010, S. 170]. Das System wird anhand von Komponenten beschrieben, die parallel, seriell oder gemischt angeordnet werden können. Zwischen RBD und FTA besteht einen Zusammenhang, da ein RBD Diagramm in ein FTA Diagramm überführt werden kann [Schnieder 2013]. Dieser Zusammenhang kann in der Abbildung 66 visualisiert werden.

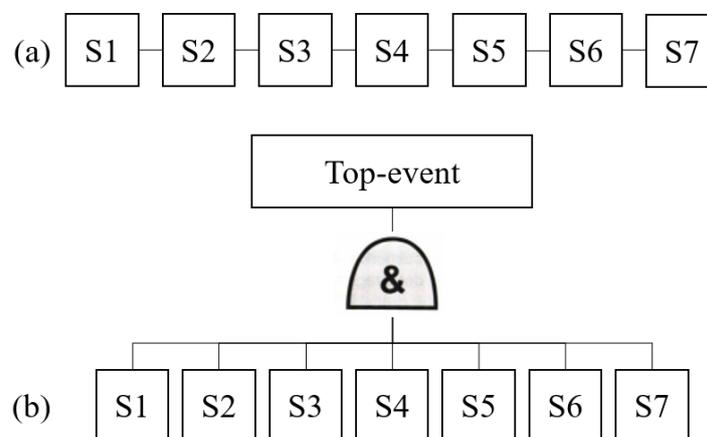


Abbildung 66: Zusammenhang zwischen RBD (a) und FTA (b) [Eigene Darstellung]

Wenn Daten zu Ausfallraten einzelner Komponenten (S1 bis S7) verfügbar sind, kann abhängig von der strukturellen Anordnung der Komponenten in der RBD, mittels der FTA die Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ und die Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ berechnet werden [Schnieder 2013]. Die Methode wird vor allem bei der Analyse sicherheitskritischer Systeme (vgl. Flugzeugtechnik oder Automobilbranche) angewendet. Im Automotivbereich gewinnt das RBD immer mehr an Bedeutung, weil sie in der ISO 26262 verankert ist, und ISO 26262 derzeit eine der wichtigsten Normen bei der Entwicklung von autonomen Systemen in der Fahrzeugtechnik darstellt.

In Tabelle 27 werden die Ergebnisse aus der Analyse dieser Methode und die daraus abgeleiteten Anforderungen an MemogaFa veranschaulicht.

Tabelle 27: Zusammengefasste Ergebnisse zu RBD und Ableitungen der Anforderungen an MemogaFa [in Anlehnung an Meyna 2010; Schnieder 2013; DIN 61078]

Input	<ul style="list-style-type: none"> • Informationen über Funktionen und Komponenten des zu untersuchenden Systems (Bei RBD wird die Funktionsfähigkeit des Systems auf Basis der strukturellen Anordnung der Komponenten analysiert), • Blockschaltbilder (z. B. über Schaltpläne bzw. Stromlaufplan), • zulässige Grenze des zu betrachtenden Systems, • Informationen über die Umwelt- und Betriebsbedingungen, da einen Ausfall auch umweltbedingt erfolgen kann, unabhängig von der Redundanz und Zuverlässigkeit eines Systems und • qualitative Daten (z. B. über die Ausfallraten einzelner Komponenten).
Output	<ul style="list-style-type: none"> • Modell der Zuverlässigkeit eines Systems und die Anwendung des Modells für die Berechnung von Maßgrößen der Zuverlässigkeit wie Funktionsfähigkeit bzw. Überlebenswahrscheinlichkeit und Verfügbarkeit und • quantitative Auswertung eines Modells (Teilsystems).
Definition von Fehlern	Nicht vorhanden.
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Die Funktionsfähigkeit und Überlebenswahrscheinlichkeit eines Teilsystems kann mittels eines RBDs quantitativ bestimmt werden, • ist in der Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanalyse eine weitverbreitete und anerkannte Technik und • Hilfreich, um zu entscheiden, bei welchen Teilsystemen eine Redundanz notwendig ist.
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Reihenfolge der Ausfälle kann anhand eines RBDs nicht ermittelt werden (zeitlicher Bezug fehlt) und • unübersichtlich und nicht zu empfehlen bei komplexen Systemen mit einer hohen Anzahl der Komponenten.
Abgeleitete Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • MemogaFa soll den zeitlichen Verlauf berücksichtigen und • MemogaFa soll für komplexe Systeme geeignet sein.

Markov-Modell

Im sogenannten Markov-Modell können gegenwärtige und zukünftige Zustände eines technischen Systems sowie Reparaturen, Redundanzen und Fehlertoleranzen abgebildet werden [DIN EN 31010; Ericson 2005; Binfet-Kull et al. 1999]. Ziel ist die Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Sicherheit des Systems, Teilsystems oder der Komponenten abhängig von der Zeit zu berechnen [Bertsche et al. 2016; Ericson 2005]. Damit ist die Markov-Analyse eine quantitative Methode in der Zuverlässigkeitstechnik. Abbildung 67 illustriert ein Markov-Modell bzw. Markov-Diagramm, dabei bedeutet „S“ die jeweiligen Zustände eines technischen Systems (z. B. Betriebszustand, Reparaturzustand usw.), während die Verbindungen zwischen diesen Zuständen, die Wahrscheinlichkeit eines Übergangs von einem Zustand zu anderem darstellen.

Ferner können die Übergangswahrscheinlichkeiten mathematisch beschrieben werden, in der Regel mithilfe einer stochastischen Übergangsmatrix. Dabei ist die Summe aller Übergangswahrscheinlichkeiten, die von einem Zustand S ausgehen, immer 1.

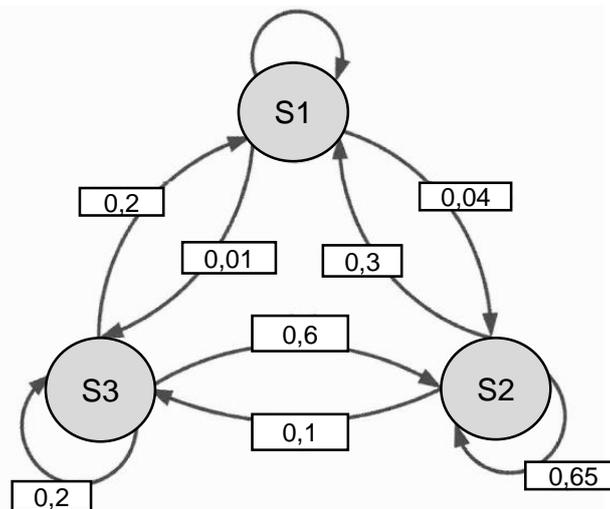


Abbildung 67: Beispiel eines Markov-Modells [In Anlehnung an DIN EN 31010, S. 68]

Die wesentlichen Informationen zur Markov-Analyse werden in Tabelle 28 zusammengefasst, um daraus die Anforderungen an die eigene Methodik herzuleiten.

Tabelle 28: Zusammengefasste Ergebnisse zur Markov-Analyse und Ableitungen der Anforderungen an MemogaFa [in Anlehnung; Schnieder 2013, DIN EN 31010, ISO IEC 31010]

Input	<ul style="list-style-type: none"> • Liste mit möglichen Zuständen des Systems, der Subsysteme oder Komponenten, • Ausfallraten von Bauteilen bzw. Komponenten, • Übergangsrate für die Übergänge in einen anderen Zustand und • Reparaturraten.
Output	<ul style="list-style-type: none"> • Markov-Diagramm bzw. Markov-Modell mit quantitativ bestimmten Betriebs-, Fehler- und Reparaturzuständen und • Schätzungen über Ausfallwahrscheinlichkeiten und/ oder Verfügbarkeit von Teil- oder Gesamtsystem.
Definition von Fehlern	Nicht vorhanden
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Abbildung einer Vielzahl in der Realität auftretender, physikalischer Phänomene (z. B. Komponentenausfall), • die Methode ist international standardisiert (DIN EN 61165 2007), • gut geeignet, um Betriebs-, Fehler- und Reparaturzustände als inhärente Systemeigenschaften zu verstehen und • Reparatur (bei separierbaren Systemen), Redundanzen und Fehlertoleranzen können in Abhängigkeit zum zeitlichen Verhalten des Systems analysiert werden.
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr schnell unübersichtlich, daher ist die Anwendung mehr für kleinere Systeme geeignet, • geeignet nur für globale Systemzustände und Modelle, die Anwendbarkeit auf komplexe Systeme, welche den iterativen Veränderungen in den Produktentwicklungsprozessen unterliegen, ist nicht gegeben, • im Rahmen der Markov-Analyse gibt es keine Verfahren zur Modularisierung von Systemen und • Anwendung ist aufwendig und bedarf einer Einarbeitung.
Abgeleitete Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • MemogaFa soll für kleine und große Systeme geeignet sein und • MemogaFa soll für die PE-Prozesse und ihre iterativen Veränderungen geeignet sein.

Anhang C: Systemtheorie, Systems Engineering und MBSE

Die Systemtheorie wird als „die Theorie zwischen Elementen eines Systems, der Beziehung zwischen Struktur und Funktion von Systemen, der Beziehung zwischen Teilsystem und Gesamtsystem“ [Ackermann 2007, S.19] bezeichnet. Haberfellner [Haberfellner et al 2012] erweitert diese Definition, indem nicht nur die Beziehungen innerhalb eines Gesamtsystems, sondern auch die Interaktion zwischen dem System und seinem Umfeld (oder Umgebung) betrachtet wird. Nach Haberfellner besteht das System aus einer Systemgrenze und Elementen, die miteinander in Beziehung stehen. Obwohl das System von seiner Umgebung durch eine „künstliche“ (System-)Grenze getrennt ist, besteht zwischen diesem und der Umgebung eine Wechselwirkung. Die Überlegung, das System von seiner Umgebung künstlich zu trennen, ist zugleich auch einen großen Vorteil des systemischen Denkens. Denn durch die Fokussierung auf die charakteristischen Bestandteile (In- und Outputs, Systemelemente, Relationen usw.) eines Systems, können Probleme besser lokalisiert und isoliert werden [Winzer 2016]. Dies gilt auch für die Fehleranalyse, der Gegenstand dieser Arbeit.

Aus dem systemischen Denken und der Systemtheorie heraus, entstand das Systems Engineering (SE) als übergeordnete Disziplin. Die industrielle und technische Anwendung der SE beginnt in den 1950er Jahren in der Raum- und Luftfahrt Branche [Gausemeier 2013]. SE „ist ein interdisziplinärer Ansatz und soll die Entwicklung von Systemen methodisch ermöglichen. SE fokussiert ein ganzheitliches und zusammenwirkendes Verständnis der Stakeholder-Anforderungen, der Entdeckung von Lösungsmöglichkeiten und der Dokumentation von Anforderungen sowie das Synthetisieren, Verifizieren, Validieren und die Entwicklung von Lösungen. Das gesamte Problem wird währenddessen von der Konzeptentwicklung bis zur Systementwicklung betrachtet. Das SE stellt hierfür geeignete Methoden, Prozesse und Best Practice bereit“ [INCOSE 2015]. Als interdisziplinäre Disziplin fungiert SE als „Bindeglied“ zwischen den unterschiedlichen Disziplinen des Ingenieurwesens (vgl. Abbildung 68).

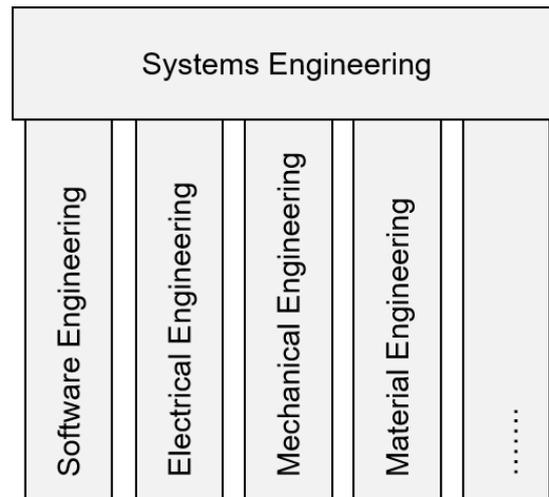


Abbildung 68: SE als interdisziplinäre Disziplin [in Anlehnung an Weilkiens 2007]

Im Rahmen der industriellen Anwendungen gab es bei der Umsetzung unterschiedlicher SE Ansätze häufig Probleme, da die Dokumentation vernachlässigt und unvollständig war. Außerdem war die Kommunikation zwischen den einzelnen Disziplinen, aufgrund der unterschiedlichen und fachspezifischen Begriffe, sehr schwierig [Chase, 1974]. Die Lösung für die „Überbrückung“ der Kommunikationsschwierigkeiten lag in der Entwicklung einer gemeinsamen Sprache durch die Nutzung eines gemeinsamen Systemmodells.

Die modellbasierte Umsetzung des SE, das MBSE, liefert eine mögliche Lösung dafür, da das MBSE die Nutzung eines gemeinsamen Systemmodells fördert, welches als Fundament einer gemeinsamen Sprache und Zusammenarbeit unterschiedlicher Disziplinen dienen soll. Dabei liegt der Fokus des gemeinsamen Systemmodells auf den Schnittstellen zwischen den jeweiligen Fachdisziplinen (Mechanik, Elektrik/ Elektronik und Softwaretechnik) [Gausemeier et al. 2013]. Somit fungiert das Modell als ein „Verständigungsmittel“ zwischen den Entwicklern und fördert die gemeinsame Kommunikation und Zusammenarbeit.

Um ein valides Modell zu erstellen, bedarf es nach Gausemeier [Gausemeier et al. 2013] und Echterhoff [Echterhoff 2016] drei wichtiger „Bausteine“, welche miteinander harmonisieren sollen:

- eine Methode (bzw. ein Ansatz),
- eine Modellierungssprache und
- ein Softwarewerkzeug.

Jedoch werden für eine konsistente Modellierung ergänzend zu den drei genannten Bausteinen auch Modellierungsregeln benötigt. Diese werden in Tabelle 29 in Form von Gestaltungsleitsätze nach Riekhof [Riekhof et al. 2013] vorgestellt.

Tabelle 29: Gestaltungsleitsätze für die Vernetzung von Systemelementen [Eigene Darstellung, in Anlehnung an Riekhof et al. 2013]

Anwendungsbereich	Gestaltungsleitsätze
Domänen-unabhängig	<ul style="list-style-type: none"> (1) Gerichtete Relationen werden in Matrizen von Zeile auf Spalte abgebildet. (2) Pro Matrix soll nur eine Relationsart abgebildet werden. (3) Es dürfen nur direkte Relationen zwischen Elementen modelliert werden. (4) Das Setzen bewusster "Nicht-Relationen" wird nicht empfohlen. (5) Werden Hierarchien genutzt, muss jede Hierarchieebene über mindestens zwei Subelemente verfügen. (6) Relationen müssen auf der untersten sachlich richtigen Ebene modelliert werden. (7) Der Grad der Detaillierung von Systemmodellen wird vom Zweck der Modellierung bestimmt. (8) Elemente eines Systems können unterschiedlich konkret und insbesondere unterschiedlich hierarchisch modelliert werden. (9) Relationen zwischen Elementen dürfen Hierarchien überspringen. (10) Relationen müssen beim Ausblenden einer Hierarchieebene bottom-up vererbt werden. (11) Beim Einblenden zuvor ausgeblendeter Hierarchieebenen müssen Relationen, sofern inhaltlich zutreffend, top-down vererbt werden. (12) Werden neue Subelemente eines Elements definiert, ist zu prüfen, ob Relationen vom Ursprungselement auf diese vererbt werden müssen.
Sichtenspezifisch	<ul style="list-style-type: none"> (13) Relationen innerhalb einer Matrix können gewichtet oder attribuiert werden. (14) Informationen, die nicht oder nur schwer im Systemmodell darstellbar sind, sollten in Partialmodellen dargestellt werden.
Sichtenintern/ Prozesssicht	<ul style="list-style-type: none"> (15) Prozesse können hierarchisch beschrieben werden (16) Prozesse können über zeitlich-logische Abfolgen verknüpft werden. (17) Prozesse können über Stoff-, Energie- und Informationsflüsse verknüpft werden.
Sichtenintern/ Komponentensicht	<ul style="list-style-type: none"> (18) Komponenten können hierarchisch beschrieben werden. (19) Relationen zwischen Komponenten können insbesondere über Stoff-, Energie- und Informationsflüsse beschrieben werden.
Sichtenintern/ Funktionssicht	<ul style="list-style-type: none"> (20) Funktionsebenen konkretisieren sukzessive den Lösungsraum. (21) Funktionskategorien können innerhalb einer Ebene, aber nicht ebenenübergreifend vernetzt werden.
Sichtenübergreifend	<ul style="list-style-type: none"> (22) Relationen zwischen Komponenten und Funktionen können als "Komponente realisiert Funktion" beschrieben werden. (23) Relationen zwischen Prozessen und Komponenten können als "Prozess nutzt Komponente" beschrieben werden. (24) Relationen zwischen Prozess und Funktion können als "Prozess nutzt Funktion" beschrieben werden.

Anhang D: Grund und Bedeutung der Modellierung im Kontext zur Fehleranalyse

Krishna [Krishna 2008] stellt das Gesamtsystem als eine Blackbox mit In- und Output dar. Hinsichtlich der Fehlerbeschreibung differenziert Krishna zwischen den Softwarefehlern (Software Faults) im System (Blackbox) und den Softwarefehlern (Software Failures), welche als Output aus dem System (Blackbox) resultieren (vgl. Abbildung 69).

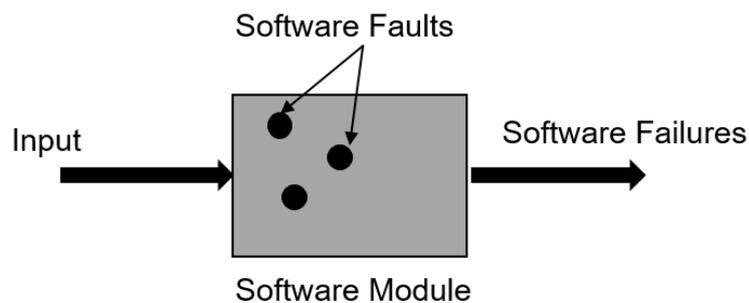


Abbildung 69: Software Faults und Software Failures in einem „Blackbox-Software Modul [in Anlehnung an Krishna 2008, S. 1.194]

Aus der Abbildung geht hervor, dass zwar die Auswirkung der Fehler bekannt ist, aber die Ursache in der Blackbox verborgen bleibt. Infolge muss die Blackbox „beleuchtet“ werden, um die Ursachen der Fehler zu identifizieren. Der Black-, Grey- und Whitebox-Ansatz nach Dyckhoff und Spengler 2010 [Dyckhoff und Spengler 2010] und Parnell [Parnell et al. 2011] scheint dafür eine geeignete Lösung zu sein, um den Weg von Black- nach White-box zu „durchleuchten“. Dabei wird das zu untersuchende System von den groben Ebenen (Blackbox) über Teilsystemen (Greybox) bis zu den unteren Ebenen (Whitebox) zerlegt und transparent dargestellt (vgl. Abbildung 70).

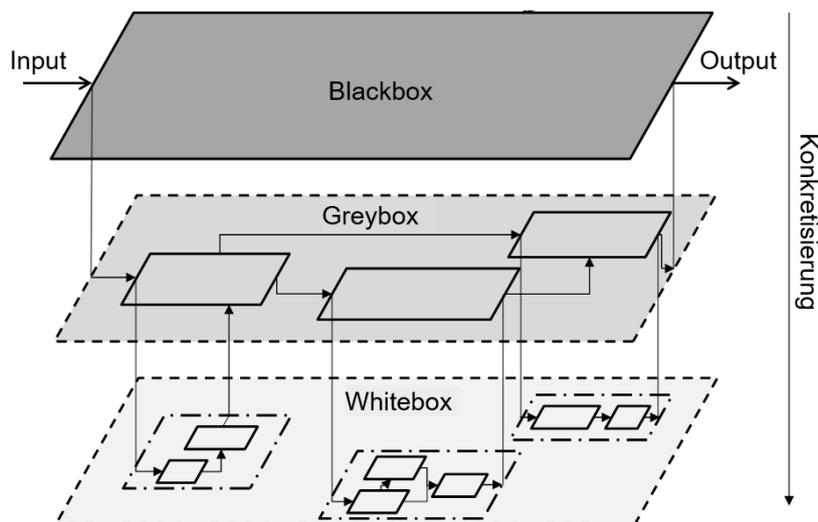


Abbildung 70: Das Black- und Greybox-Modell [in Anlehnung an Dyckhoff und Spengler 2010 und Parnell et al. 2011]

Erst in der Whitebox, oder der transparenten Ebene des Systems, werden die Vernetzungen und Beziehungen von Elementen des Systems sichtbar [Parnell et al. 2011]. Dadurch ist eine Fehleranalyse möglich, um die Fehlerursachen, die in der Blackbox verborgen waren, zu detektieren (vgl. Abbildung 71).

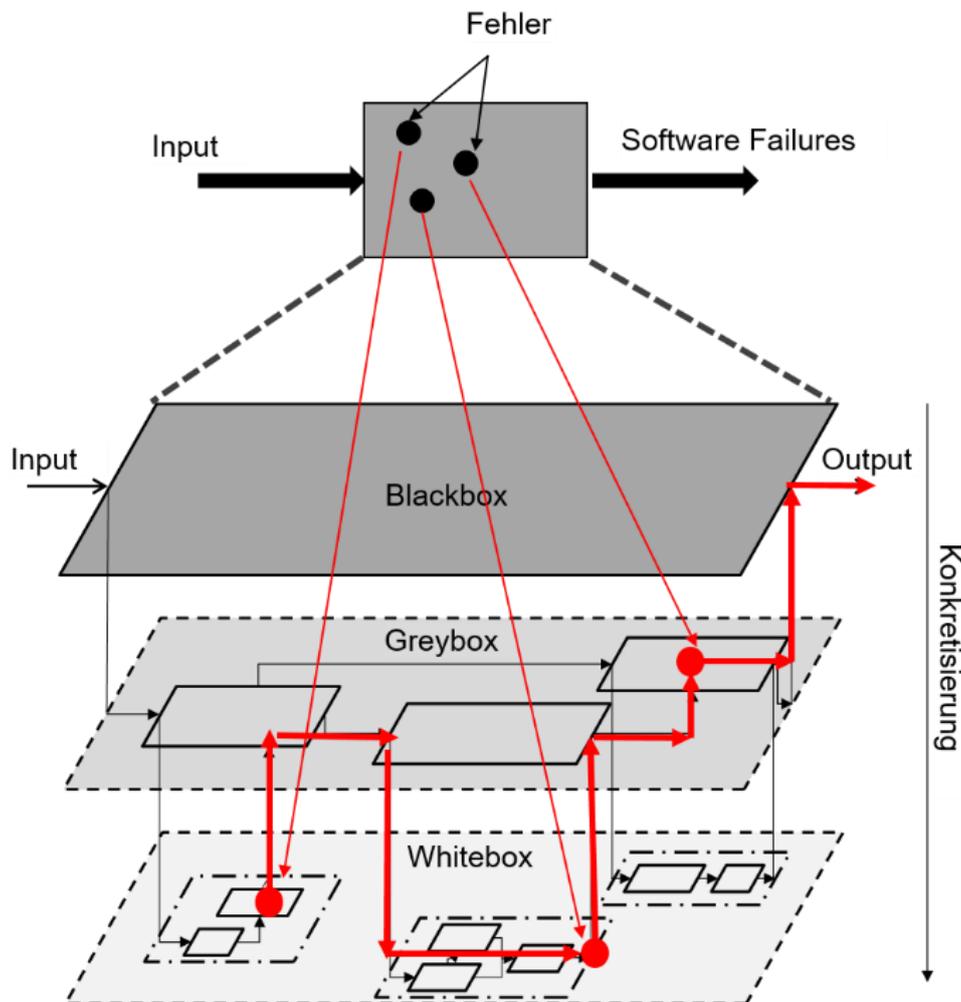


Abbildung 71: Identifikation der Zusammenhänge der Fehlerursachen und -auswirkung anhand des Black-Greybox Modells [Eigene Darstellung in Anlehnung an Krishna 2008, Dyckhoff und Spengler 2010 und Parnell et al. 2011]

Die Darstellung aus Abbildung 71 verdeutlicht und untermauert die Bedeutung und Nutzbarkeit des Systemmodells als Basis für die Fehleranalyse. Denn erst durch das Systemmodell werden komplexe Zusammenhänge, Wechselwirkungen und Beziehungen aus Ursachen und Auswirkungen von Fehlern zwischen unterschiedlichen Systemelementen für die Analyse sichtbar.

Anhang E: Ansätze der Modellierung

Modelica

Modelica ist eine objektorientierte Modellierungssprache mit dem Fokus auf die Simulation physikalischer Zusammenwirkungen für mechatronische Systeme, Subsysteme und Komponenten [Scheeren 2014, Ott 2009]. Ein besonderer Aspekt bei Modelica ist die sogenannte Modellbibliothek, welche einen umfangreichen Input für das Modell liefert. Des Weiteren beinhaltet Modelica mathematische Gleichungen womit Berechnungen, beispielsweise zur Ausfallrate, realisiert werden können. Damit ist Modelica mit den Methoden der Zuverlässigkeitstechnik (RBD, Markow-Modell) kombinierbar, benötigt aber valide Daten als Eingangsinformationen für aussagekräftige Ergebnisse. Eine weitere Stärke dieser Modellierungssprache liegt in der Vielfalt der Visualisierungen des Systemmodells, da in der Modelbibliothek zahlreiche Symbole und Diagramme zur Verfügung stehen. Zudem können auch CAD-Zeichnungen in Modelica integriert werden.

Um mechatronische Systeme physikalisch zu beschreiben, berechnen und simulieren, eignet sich Modelica sehr gut. Jedoch für die modellbasierte Fehleranalyse fehlt die Beschreibung der Funktionen, welche für die Fehlerdefinition und Fehlerklassifikationen grundlegend ist (vgl. Abschnitt 2.2). Ferner benötigt Modelica Daten zu einzelnen Komponenten oder Teilsystemen, die in den frühen Phasen der PE schwierig zu beschaffen sind. Außerdem kann das Systemmodell ausschließlich „nur“ auf den physikalischen, vorgegebenen Ebenen erstellt werden, sodass eine Anpassung des Modells an ein anderes „Wording“ nicht möglich ist.

CONSENS

Die Modellierungssprache CONceptual design Specification technique for the ENgineering of complex Systems (CONSENS) wird mithilfe der Software „Mechatronic Modeller“ umgesetzt. Ähnlich wie Modelica ist auch CONSENS für die Modellierung mechatronischer Systeme konzipiert.

Das Ziel der Modellierung ist eine Prinziplösung zu erarbeiten [Tschirner 2016, S. 60]. Um dieses zu erreichen, wird zuerst das Problem analysiert. Daraufhin wird die Wechselbeziehung zwischen System und seiner Umwelt analysiert. Aus den Anwendungsszenarien werden Anforderungen generiert, aufgelistet und klassifiziert. Aus den Anforderungen werden die Funktionen hergeleitet und spezifiziert. Dabei können die Funktionen als hierarchische Struktur dargestellt werden [Gausemeier et al. 2008]. Überdies werden die Funktionen mit den Anforderungen und den Systemelementen über Verknüpfungen und Querverweise in eine Beziehung gesetzt. Mit „Systemelementen“ ist bei CONSENS die physikalische Domäne gemeint [Dumitrescu et al. 2015].

Die wichtigsten Eigenschaften von CONSENS sind die Darstellung der Wirkstruktur und der Anwendungsszenarien, die in der Software transparent dargestellt werden.

Zudem wird durch die Zerlegung des Gesamtmodells in Partialmodelle eine gute Übersicht über das Gesamtsystem ermöglicht. Dafür nutzt CONSENS die Prinzipien einer „Top-down Modellierung“ nach dem Ansatz vom Black- und Greybox-Modell. Die Wechselbeziehungen zwischen den Partialmodellen werden in der Wirkstruktur anhand physikalischer Grundprinzipien analysiert [Tschirner 2016, S. 61]. Allerdings ist unklar, ob eine Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen Funktionen, Störfunktionen, Systemelementen (Komponenten) und Anforderungen in dieser Modellierungssprache vorgesehen ist. Weiterhin ist nicht bekannt, wie Informationen aus diesem Systemmodell zielgerichtet für MdF genutzt werden können. Ferner kann das Gesamtmodell aufgrund vieler Partialmodelle und Diagramme unübersichtlich werden.

SysML

SysML ist eine Modellierungssprache, welche auf UML aufbaut und für die Anwendung im Systems Engineering angepasst wurde [Alt 2012]. Praktisch umgesetzt wird SysML über unterschiedliche Softwaresysteme (vgl. IBM Rational Rhapsody Architect oder MagicGrid).

SysML verfügt über eine eigene Notation, womit Systemelemente attribuiert und Relationen beschrieben werden können. Das Systemmodell wird anhand unterschiedlicher Diagramme (z. B. Struktur-, Verhalten-, Requirements-, Parametrics- und Use-case - Diagramm) charakterisiert.

Außerdem sind in SysML Anforderungs- und Funktionsstrukturen sowie eine physikalische Domäne vorgesehen. Die große Anzahl an Diagrammen erlaubt es, das Systemmodell aus unterschiedlichen Blickwinkeln zu betrachten. Dies ist zugleich auch einen Nachteil bei SysML, denn: „Der enorme Umfang an Diagrammen und Konstrukten, deren Verwendung zum Teil nur grob vordefiniert ist, lässt nicht immer eine eindeutige oder gar intuitive Verwendung zu.“ [Dumitrescu 2011, S. 69]. Des Weiteren ist aufgrund umfangreicher Diagramme und Domänen eine aufwändige Einarbeitung in SysML erforderlich [Friedenthal 2009, Dumitrescu 2011]. Ferner ist die Struktur in SysML bereits vorgegeben, sodass eine Anpassung für einen anderen Modellierungszweck (z. B. für die Identifikation potentieller Fehler) nicht möglich ist.

Anhang F: Szenarien, Erprobung und Validierung

Erprobungsszenario K-VEC:

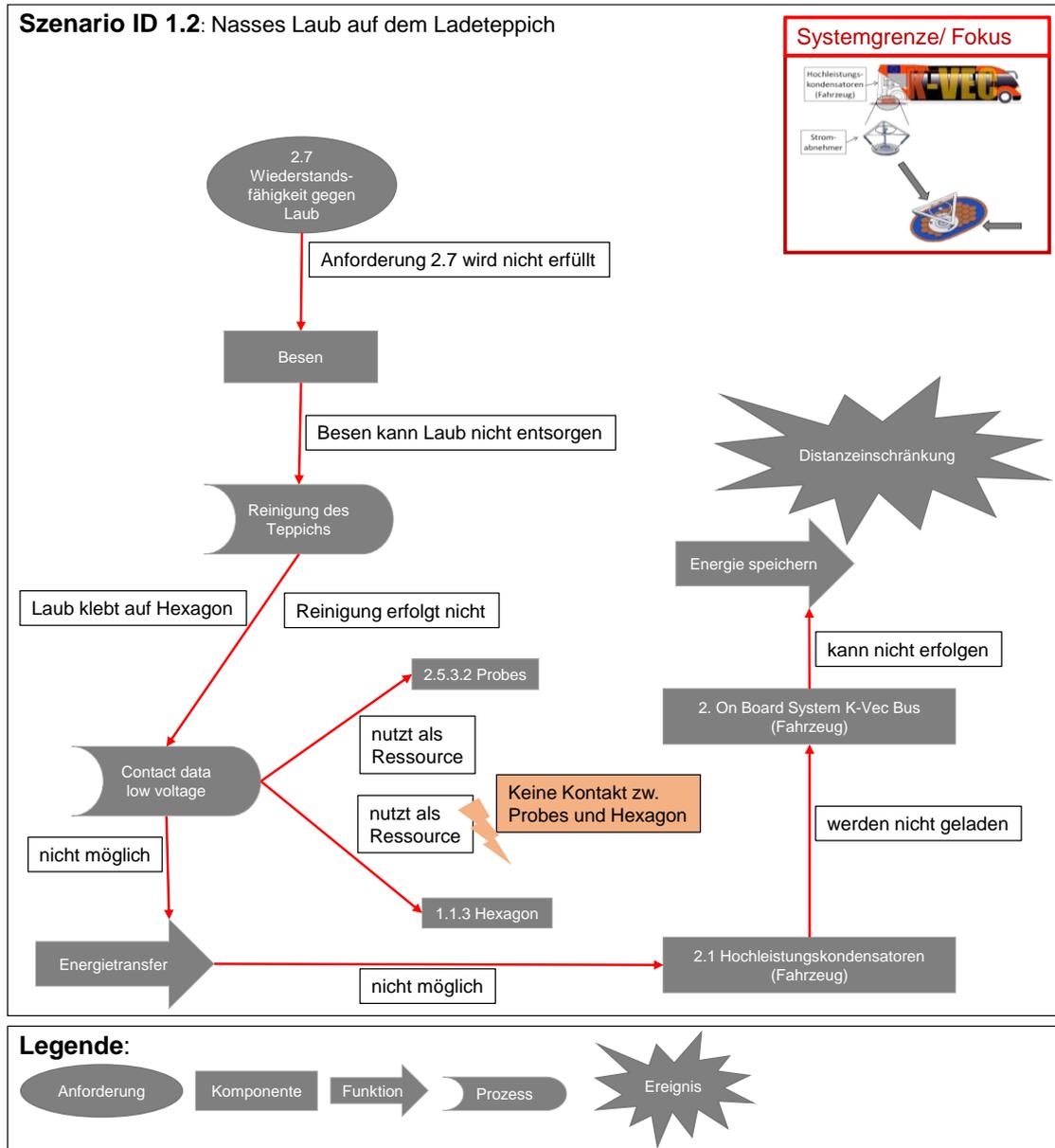


Abbildung 72: Beispiel von einem erarbeiteten Szenario zum kritischen Nutzungsprozess „Bus lädt an der Haltestelle“ aus dem K-VEC Systemmodell [eigene Darstellung]

Anwendungsszenarien K-VEC:

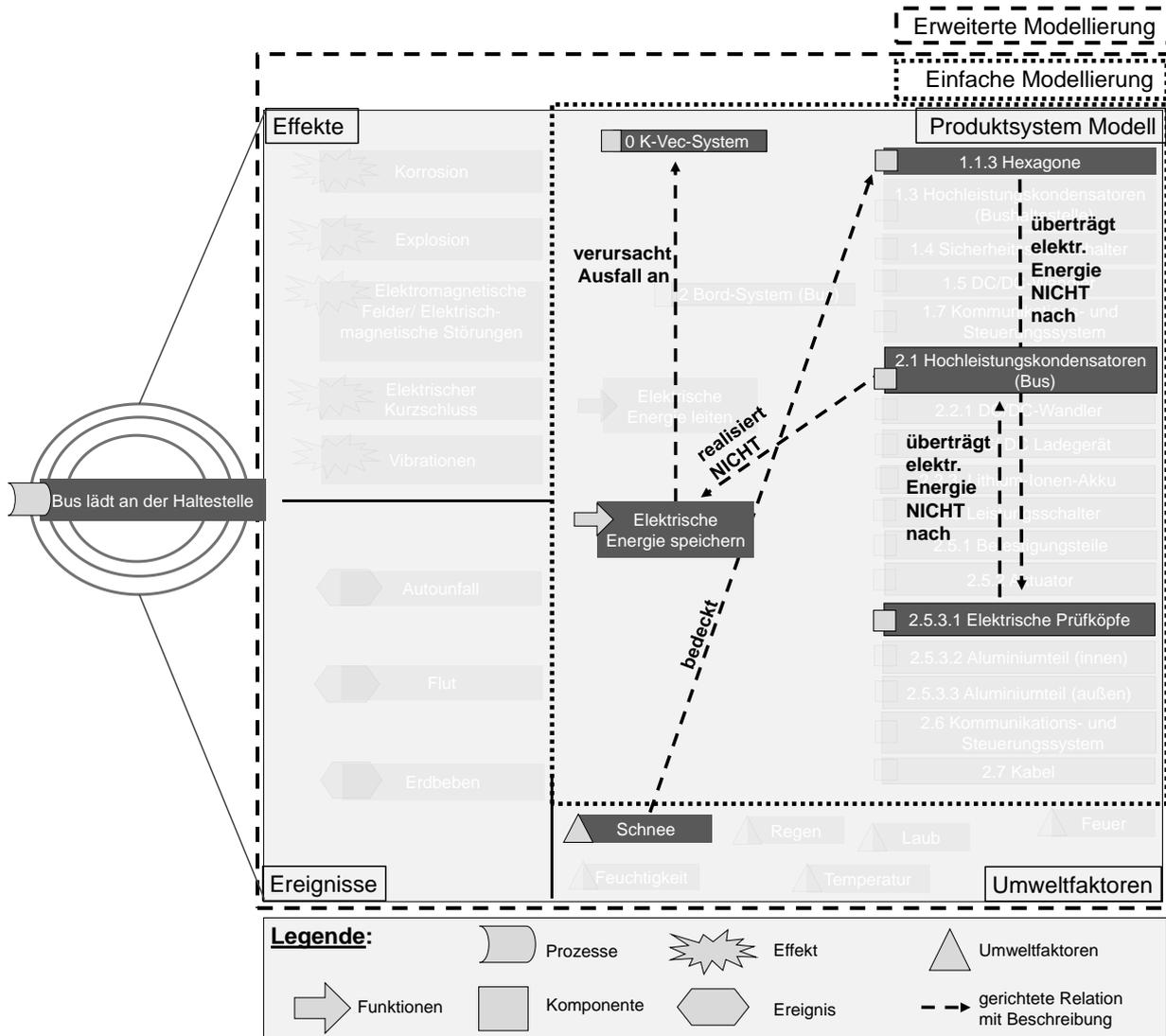


Abbildung 73: Potentielles Fehlernetz, Szenario „Schnee auf dem Ladeteppich“ [Eigene Darstellung]

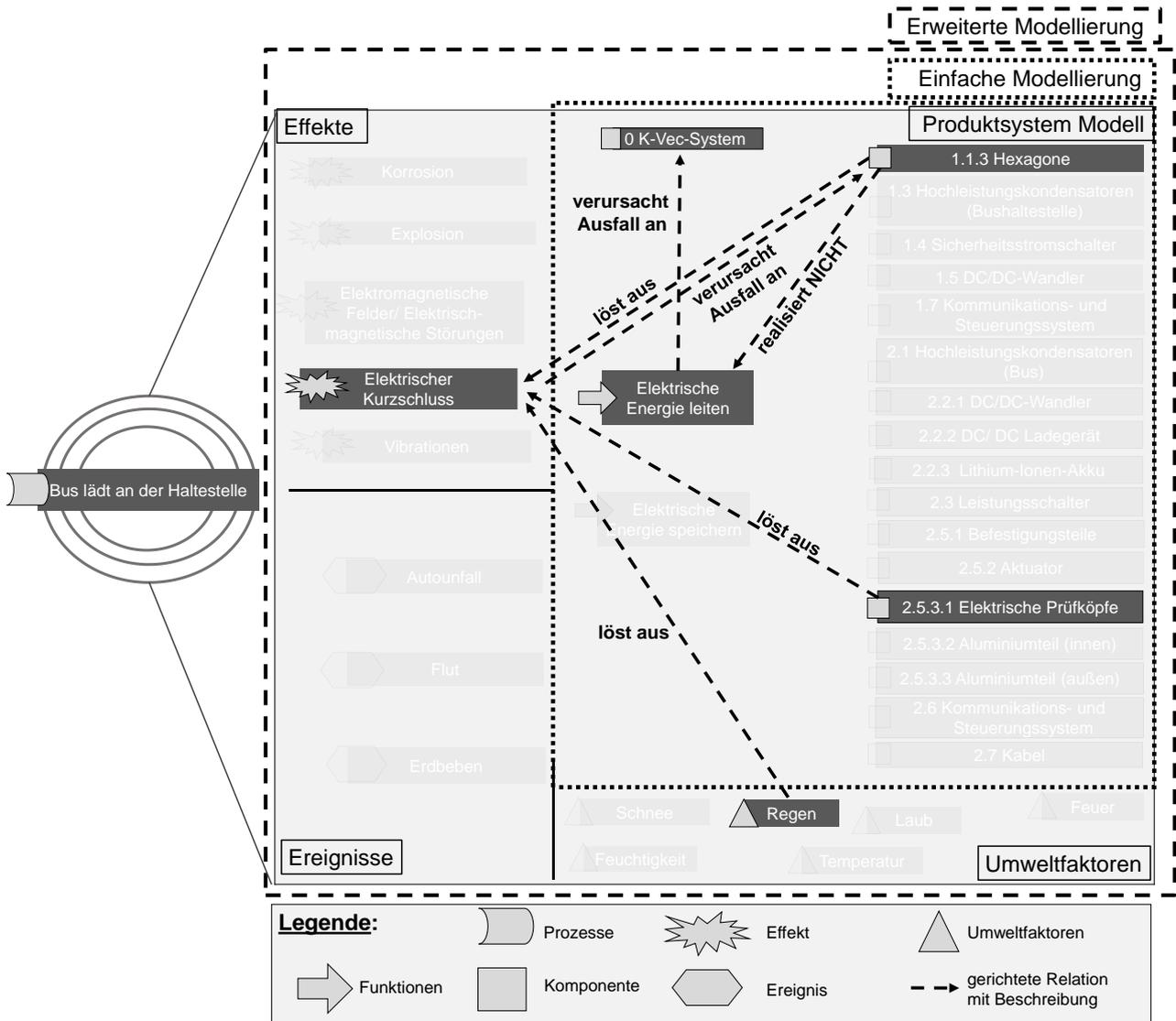


Abbildung 74: Potentielles Fehlernetz, Szenario „Regenwasser“ [Eigene Darstellung]

Anwendungsszenarien Q-ELF:

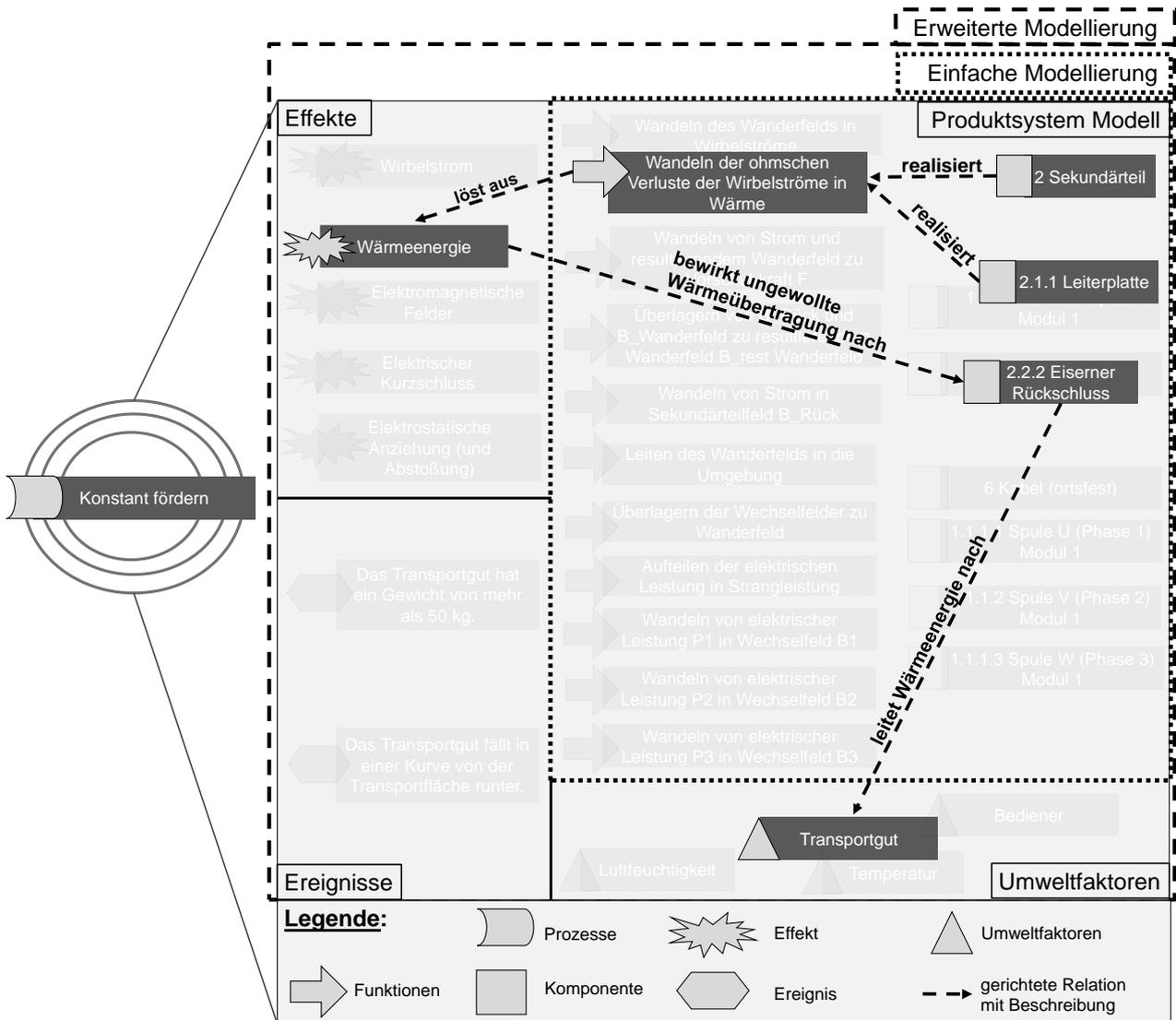


Abbildung 75: Beispielszenario „Erwärmung des eisernen Rückschlusses“ im Q-ELF Systemmodell [Eigene Darstellung]

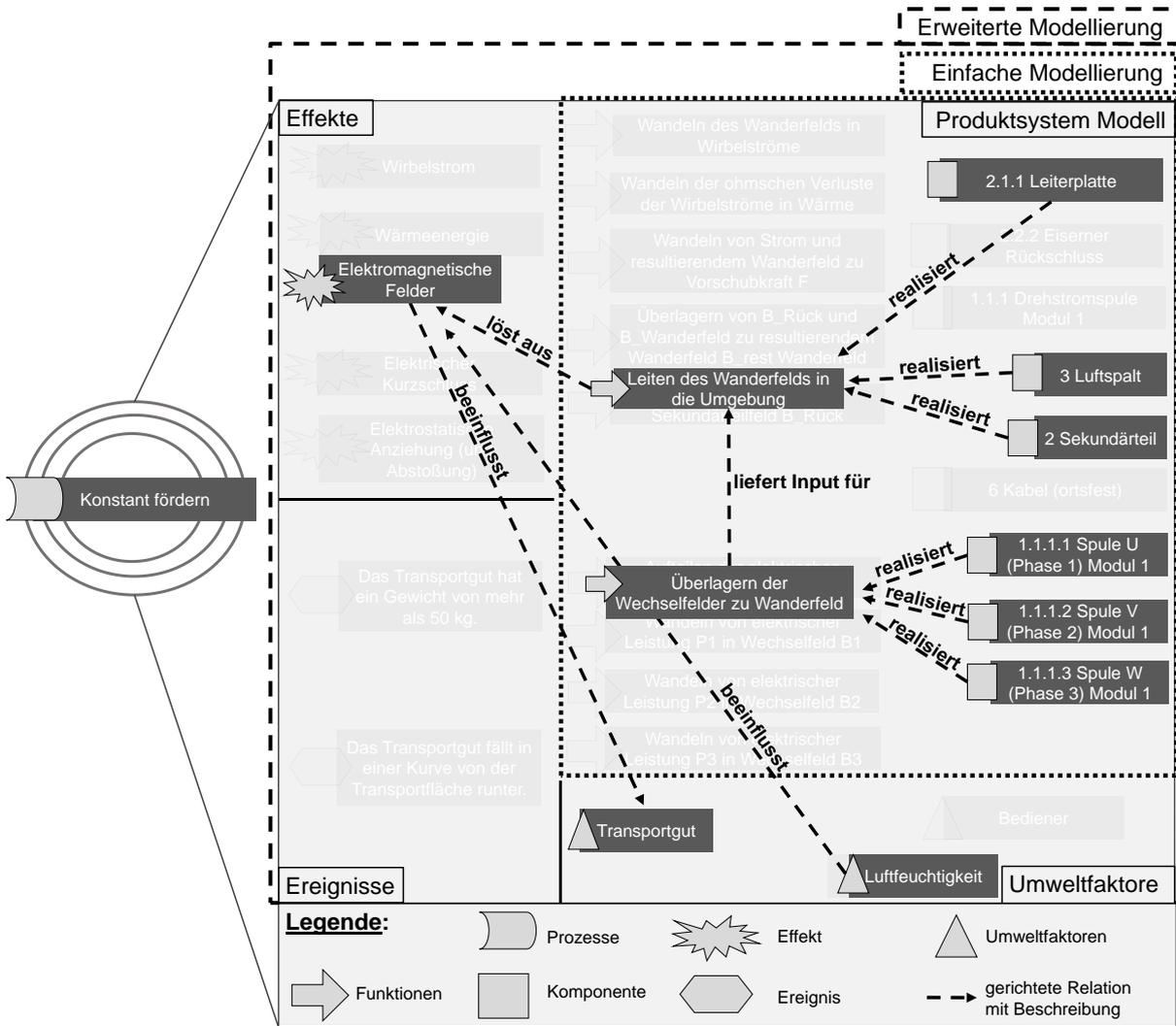


Abbildung 76: Beispielszenario „elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)“ im Q-ELF Systemmodell [Eigene Darstellung]

Anhang G: Ausschnitte zum Tool zur ganzheitlichen Fehlerbeschreibung

Seite 1

Allgemeine Informationen Hilfe

Auf dieser Seite werden allgemeine Informationen, wie die Szenario-ID, der Verfasser, die aktuelle Version oder das aktuelle Datum abgefragt. Diese Angaben sind verpflichtend, um eine rückverfolgbare Dokumentation zu gewährleisten.

Hinweis:
Sollten Sie einen Fehler bearbeiten, achten Sie vor allem darauf, dass Sie den Versionsstand aktualisieren. Andernfalls wird ein Speichern des Datensatzes nicht möglich sein.

Szenario-ID (Zahl):

Szenario-Beschreibung:

Versionsstand (Großbuchstabe):

Datum der Bearbeitung: 06.03.2020

Name des Verfassers:

Abteilung des Verfassers:

E-Mail des Verfassers:

Zurück **Abbruch** **Weiter**

Abbildung 77: Abschnitt 1 - Allgemeine Informationen

Seite 2

Fehlerursachen

ID Version **Hilfe**

Produktsystemmodell

Funktionsfehler:

Auswahl
(2) Nicht gewollte Funktion

Beschreibung

Komponentenfehler:

Auswahl
(2) Sekundärer Komponentenausfall

Beschreibung

Anforderungsfehler:

Auswahl
(2) Keine der genannten Optionen

Beschreibung

Prozessfehler:

Auswahl
(2) Keine der genannten Optionen

Beschreibung

Umweltfaktoren

Auswahl
(2) Feuchtigkeit

Beschreibung

Ereignisse

Auswahl
(2) Explosion

Abbildung 78: Abschnitt 2 – Fehlerursachen

Seite 3

Wirkung der Fehlerursache(n) ID Version **Hilfe**

Produktsystemmodell

Funktionsfehler:

Auswahl
(1) Funktionsausfall
(2) Nicht gewollte Funktion

Beschreibung

Komponentenfehler:

Auswahl
(1) Primärer Komponentenausfall
(2) Sekundärer Komponentenausfall

Beschreibung

Anforderungsfehler:

Auswahl
(1) Nicht erfüllte Anforderung
(2) Keine der genannten Optionen

Beschreibung

Prozessfehler:

Auswahl
(1) Fehler im Prozess
(2) Keine der genannten Optionen

Beschreibung

Umweltfaktoren

Auswahl
(1) Temperatur
(2) Feuchtigkeit

Beschreibung

Ereignisse

Auswahl
(1) Autounfall
(2) Explosion

Beschreibung

Effekte

Auswahl
(1) Mechanisch
(2) Hydraulisch

Zurück **Abbruch** **Weiter**

Abbildung 79: Abschnitt 3 - Wirkung der Fehlerursache(n)

Seite 4 — □ ×

Fehlerauswirkungen

Auf dieser Seite sollen zunächst die zuvor erarbeiteten Fehlerarten mit Hilfe der Fehlerursachen und Fehlerauswirkungen weiter spezifiziert werden.

auf das technische System

Auswahl	Beschreibung
(1) Gesamt-Systemebene (2) Teil-Systemebene (3) Bauteil	

auf den Menschen (Personenschaden)

Auswahl	Beschreibung
(1) Ja (2) Nein	

auf Stakeholder

Auswahl	Beschreibung
(1) Kunden (2) Lieferanten (3) Unternehmen (4) Staat	

Abbildung 80: Abschnitt 4 - Fehlerauswirkung

Fehlerrisiko

ID		Version		Hilfe
----	--	---------	--	-------

Auf dieser Seite soll im letzten Schritt das vom Fehler ausgehende Risiko abgeleitet werden. Dazu wird eine Risikomatrix zur Verfügung gestellt, welche zum einen die Schadensschwere durch einen Fehler und zum anderen die Häufigkeit des Auftretens eines Fehlers aufzeigt. Durch das Anklicken der gefärbten Schaltflächen wird letztlich das Risiko ausgegeben. Sollten sich Fragen zu Begrifflichkeiten, wie bspw. "häufig" ergeben, so können weitere Informationen über die jeweiligen Schaltflächen entnommen werden.

Hinweis: Bedenken Sie, dass im Falle eines möglichen Personenschadens nur eine Schadensschwere von "Kritisch" ausgewählt werden kann.

Schadensschwere

Risikomatrix	Niedrig	Mittel	Hoch	Kritisch
Häufig	20	50	80	100
Wahrscheinlich	16	40	64	80
Gelegentlich	12	30	48	60
Selten	6	15	24	30
Unwahrscheinlich	2	5	8	10
Unvorstellbar	0	0	0	0

Häufigkeit

Risiko des Fehlers: Wert:

Zurück	Abbruch	Anlegen
--------	---------	---------

Abbildung 81: Abschnitt 5 - Risikomatrix nach VDA [VDA Band 4]

Allgemeine Informationen					
1		Allgemeine Informationen			
Szenario-ID	Szenario Beschreibung	Versionsstand	Datum der Bearbeitung	Name des Verfassers	
1	EMV	C	19.06.2019	Musterman	
2	Schnee auf dem Ladeteppich	A	04.09.2019	Musterman	
3	Regenwasser fließt in die Hexagons des Ladeteppichs	B	04.09.2019	Musterman	

Fehlerursachen			
2		Fehlerursachen	
Funktionsfehler (FF)		Komponentenfehler (KF)	
Auswahl_FF	Beschreibung_FF	Auswahl_KF	Beschreibung_KF
(1) Funktionsausfall (4) Keine der genannten Optionen	Geforderte Funktion: "Elektrische Energie leiten"	(5) Keine der genannten Optionen	Komponente "2.2 DC/DC Wandler" verursacht ein elektromagnetisches Feld
		(4) Sonstige	Schnee
		(4) Sonstige	Regen

Abbildung 82: Auszüge aus dem Fehlerbeschreibungstool (Bereiche 1 und 2), detaillierte Beschreibung der Fehlernetze zu drei erarbeiteten Szenarien für das K-VEC System im Tool der Fehlerbeschreibung [Eigene Darstellung]

3 Wirkung der Fehlerursachen			
Funktionfehler (FF)		Komponentenfehler (KF)	
Auswahl_FF	Beschreibung_FF	Auswahl_KF	Beschreibung_KF
(1) Funktionsausfall	"Elektrische Energie speichern"	(4) Kaskadierender Komponentenausfall	1.1.3 Hexagon; 2.1 Hochleistungskondensatoren (Bus); 2.5.3.1 Elektrische Prüfköpfe
(1) Funktionsausfall	"Elektrische Energie leiten"	(4) Kaskadierender Komponentenausfall	1.1.3 Hexagone 2.5.3.1 Elektrische Prüfköpfe
			Elektrisch-magnetische Störungen

4 Fehlerauswirkung auf das technische System			
auf den Menschen (Personenschaden)		auf Stakeholder (S)	
Auswahl_TS	Beschreibung_TS	Auswahl_M	Beschreibung_M
(1) Gesamt-Systemebene (2) Teil-Systemebene	(1) Folge auf der Gesamt-Systemebene: Ausfall der Hauptfunktion „Energietransfer“. Folge auf (2) Teil-Systemeben: Störung der Komponente 2.6 Kommunikations- und Steuerungssystem durch EMV.	(2) Nein	(1) Unzufriedene Kunden und (3) Imageschaden des Unternehmens
(1) Gesamt-Systemebene	0. K-VEC System	(2) Nein	(1) Kunden (3) Unternehmen
(1) Gesamt-Systemebene	0. K-VEC System	(2) Nein	(1) Kunden (3) Unternehmen

5 Risiko des Fehlers	
Risiko	Wert
Nicht tolerierbar	64
Unerwünscht	48
Unerwünscht	48

Abbildung 83: Auszüge aus dem Fehlerbeschreibungstool (Bereiche 3, 4 und 5), detaillierte Beschreibung der Fehlernetze zu drei erarbeiteten Szenarien für das K-VEC System im Tool der Fehlerbeschreibung [Eigene Darstellung]

1 Allgemeine Informationen					
Szenario-ID	Szenario Beschreibung	Versionsstand	Datum der Bearbeitung	Name des Verfassers	
1	Hauptanforderung nicht erfüllt	B	05.09.2019	Mustermann	
2	Erwärmung des eisernen Rückschlusses	C	05.09.2019	Mustermann	
3	EMV	C	05.09.2019	Mustermann	

2 Fehlerursachen					
Funktionsfehler (FF)			Komponentenfehler (KF)		
Auswahl_FF	Beschreibung_FF	Auswahl_KF	Beschreibung_KF	Auswahl_UF	Beschreibung_UF
(5) Keine der genannten Optionen			1.1.1.1 Spule U (Phase 1) verursacht einen Kurzschluss aufgrund schlechter Isolierung. Komponenten 2. Sekundärteil und 2.1.1 Leiterplatte realisieren die ungewollte Funktion "Wandeln der ohmschen Verluste der Wirbelströme in Wärme".		
(4) Keine der genannten Optionen	Funktion "Überlagern der Wechselfelder zu Wanderfeld" liefert Input für die ungewollte Funktion "Leiten des Wanderfelds in die Umgebung".	(5) Keine der genannten Optionen	Komponenten 2.1.1 Leiterplatte, 3 Luftspalt und 2 Sekundärteil realisieren die ungewollte Funktion "Leiten des Wanderfelds in die Umgebung".	(2) Feuchtigkeit	Luftfeuchtigkeit beeinflusst die elektromagnetische Felder

Abbildung 84: Auszüge aus dem Fehlerbeschreibungstool (Bereiche 1 und 2), detaillierte Beschreibung der Fehlernetze zu drei erarbeiteten Szenarien für das Q-ELF System im Tool der Fehlerbeschreibung [Eigene Darstellung]

3 Wirkung der Fehlerursachen			Wirkung der Fehlerursache(n)					
Funktionsfehler (FF)		Komponentenfehler (KF)			Umweltfaktoren		Effekte	
Auswahl_FF	Beschreibung_FF	Auswahl_KF	Beschreibung_KF	Auswahl_UF	Beschreibung_UF	Auswahl_EF	Beschreibung_EF	
(3) Fehlfunktion	Funktionen „Wandeln von elektrischer Leistung P1 in Wechselfeld B1“ und „Wandeln von Strom und resultierendem Wanderfeld zu Vorschubkraft F“ werden nicht realisiert.					(3) Elektrisch	Elektrischer Kurzschluss	
(3) Fehlfunktion	"Wandeln der ohmschen Verluste der Wirbelströme in Wärme" (5) Keine der genannten Optionen		Komponente 2.2.2 Eisener Rückschluss überträgt Wärme an Transportgut	(4) Sonstige	Transportgut	(6) Sonstige	Wärmeenergie	
(3) Fehlfunktion	Funktionen „Wandeln von elektrischer Leistung P1 in Wechselfeld B1“ und „Wandeln von Strom und resultierendem Wanderfeld zu Vorschubkraft F“ werden nicht realisiert.			(4) Sonstige	Transportgut	(3) Elektrisch	Elektromagnetische Felder	

4 Fehlerauswirkung		Fehlerauswirkungen						
auf das technische System		auf den Menschen (Personenschaden)			auf Stakeholder (S)			
Auswahl_TS	Beschreibung_TS	Auswahl_M	Beschreibung_M	Auswahl_S	Beschreibung_S	Auswahl_S	Beschreibung_S	Auswahl_S
(1) Gesamt-Systemebene		(2) Nein		(1) Kunden (3) Unternehmen (5) Mitarbeiter				
(2) Teil-Systemebene	Transportgut	(2) Nein		(1) Kunden (3) Unternehmen (6) Eigentümer (7) Inverkehrbringer				
(2) Teil-Systemebene	Transportgut	(2) Nein		(1) Kunden (3) Unternehmen (6) Eigentümer (7) Inverkehrbringer				

5 Risiko des Fehlers	
Risiko	Wert
Nicht tolerierbar	64
Unerwünscht	48
Unerwünscht	48

Abbildung 85: Auszüge aus dem Fehlerbeschreibungstool (Bereiche 3, 4 und 5), detaillierte Beschreibung der Fehlernetze zu drei erarbeiteten Szenarien für das Q-ELF System im Tool der Fehlerbeschreibung [Eigene Darstellung]

Anhang H: Abbildungen zur Modellierung des K-VEC Produktsystems

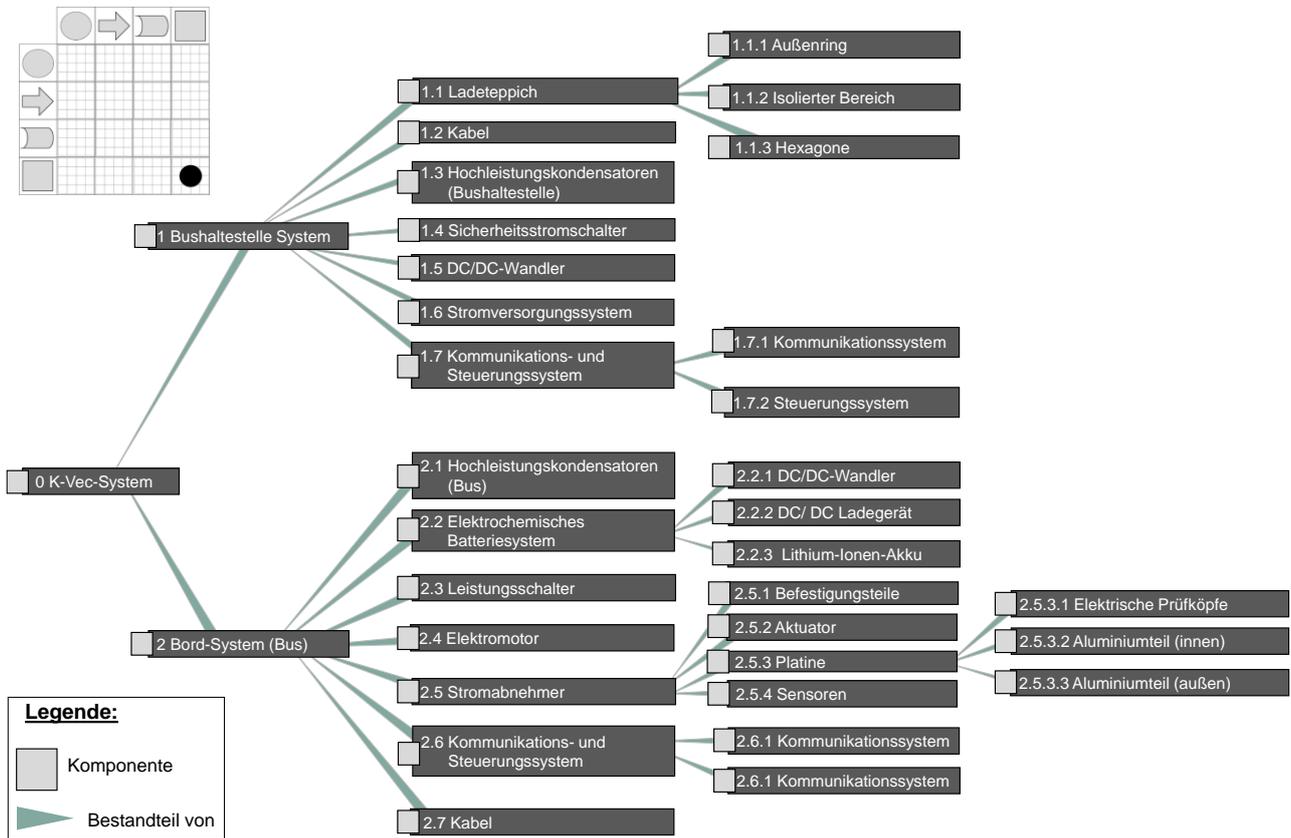


Abbildung 86: Komponenten-Komponenten Hierarchie K-VEC System [Überarbeitete Abbildung aus LOOME0]

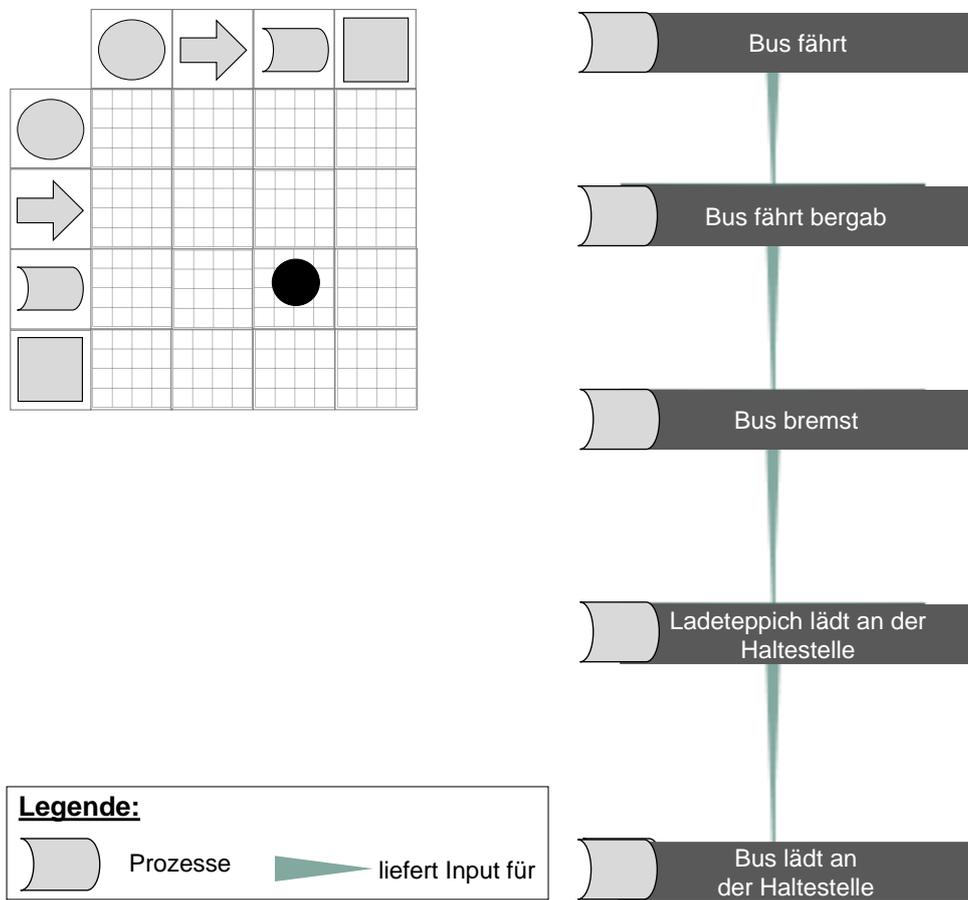


Abbildung 87: Prozesse-Prozesse Matrix, K-VEC System [Überarbeitete Abbildung aus LOOME0]

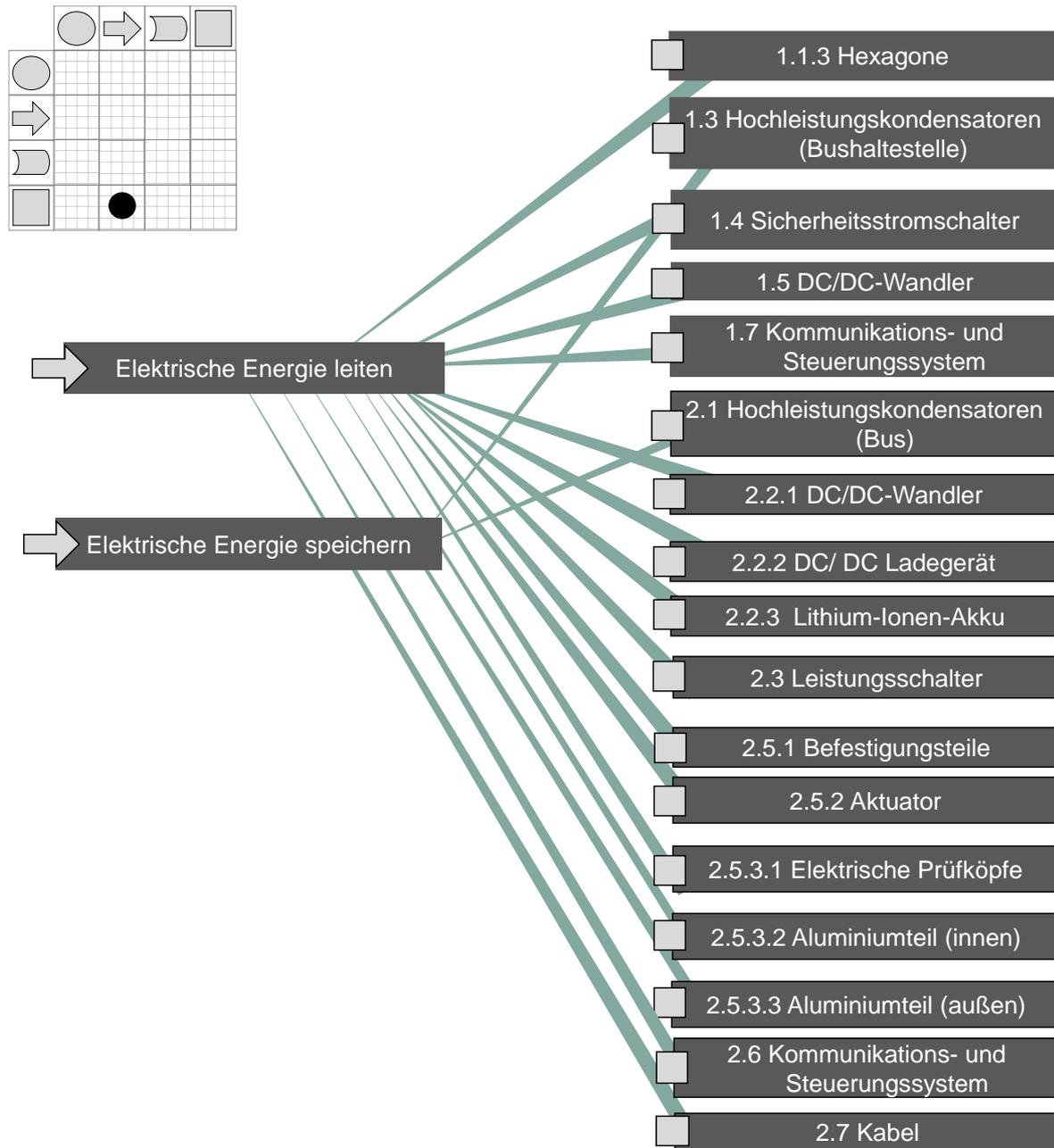


Abbildung 88: Funktionen-Komponenten Matrix aus K-VEC System [Überarbeitete Abbildung aus LOOMEQ]

Anhang I: Abbildungen zur Modellierung des Q-ELF Produktsystems

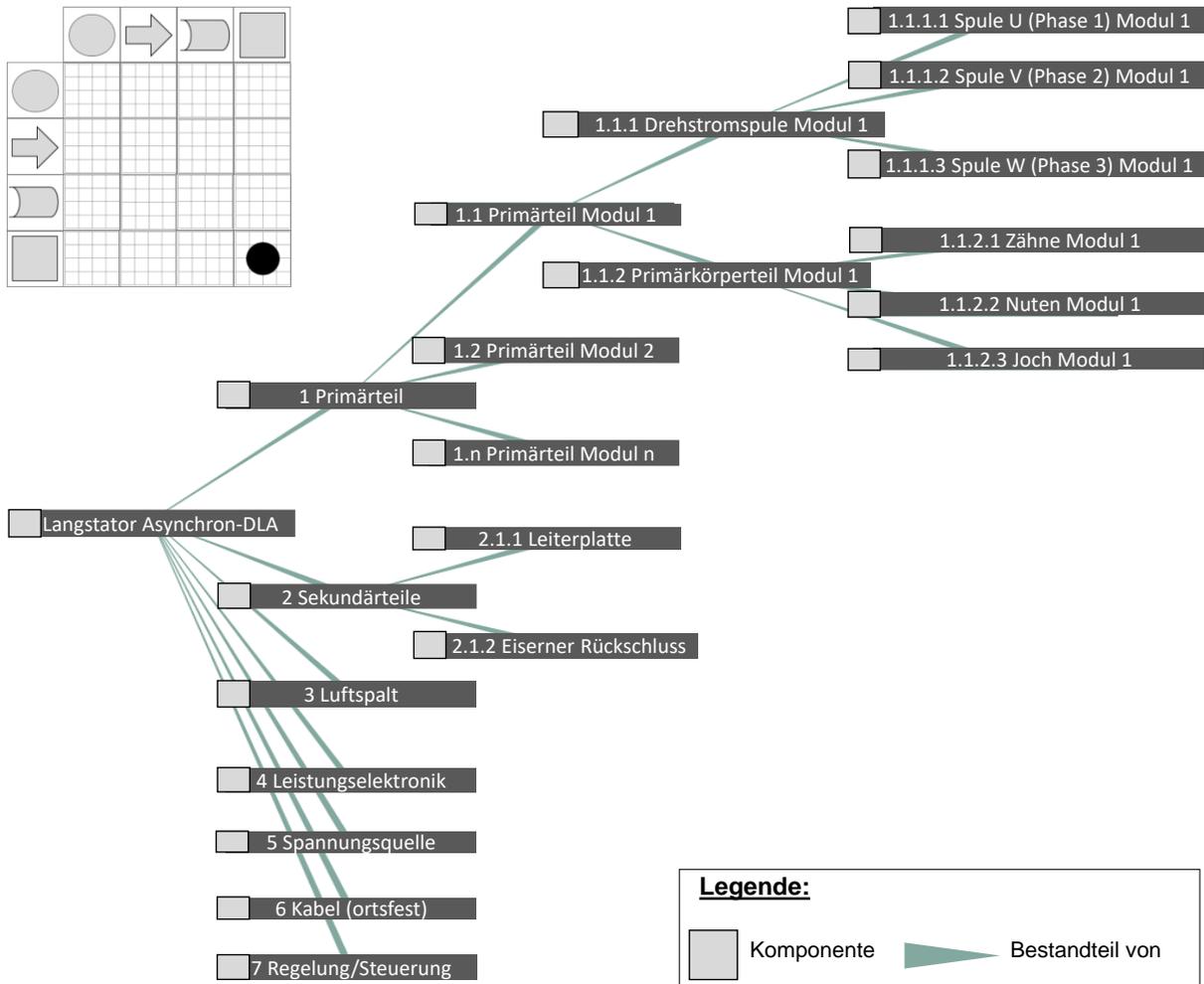


Abbildung 89: Komponentenhierarchie des Langstator-Asynchron-Drehstromlinearantriebs (Prinzipdarstellung aus Looemo [in Anlehnung an Riekhof und Willing 2013])

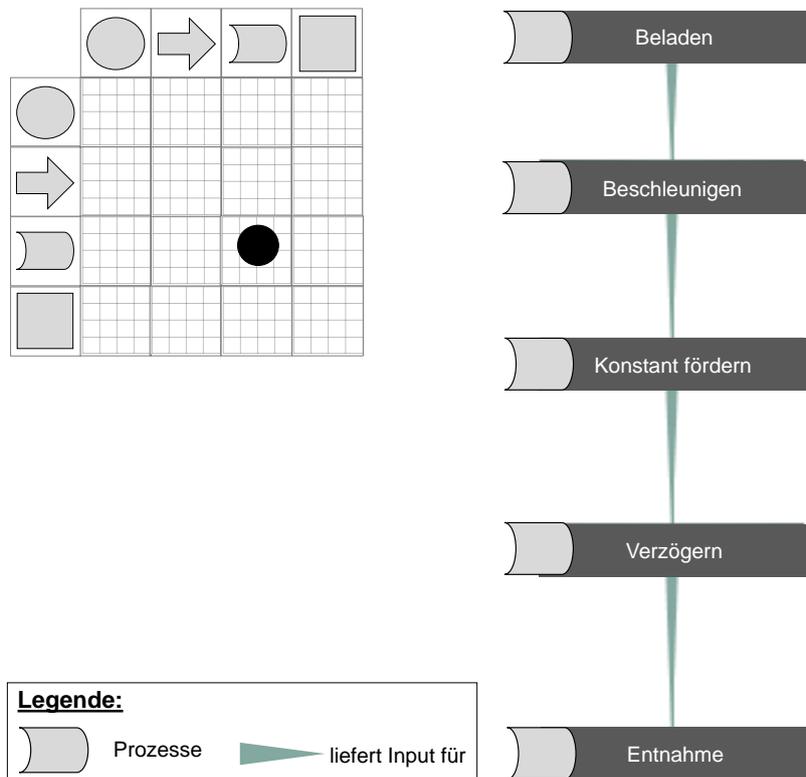


Abbildung 90: Abfolge der Nutzungsprozesse des Langstator-Asynchron-Drehstromlinearantriebs (Prinzipdarstellung, überarbeitet aus LOOME0 [in Anlehnung an Riekhof und Willing 2013])

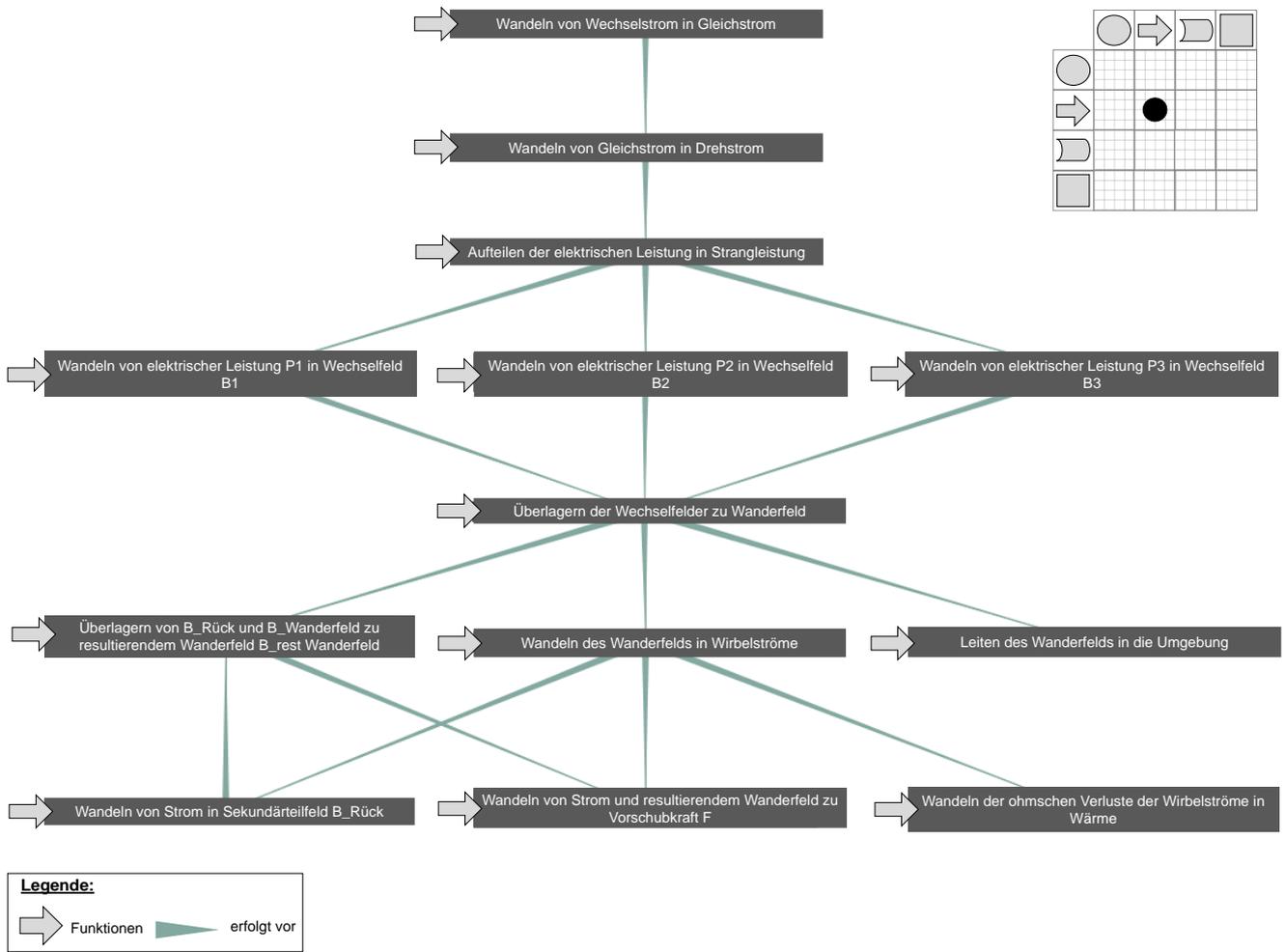


Abbildung 91: Abfolge der Funktionen zum Nutzungsprozess „Konstant fördern“ des Langstator-Asynchron-Drehstromlinearantriebs (Prinzipdarstellung, überarbeitet aus LOOME0 [in Anlehnung an Riekhof und Willing 2013])

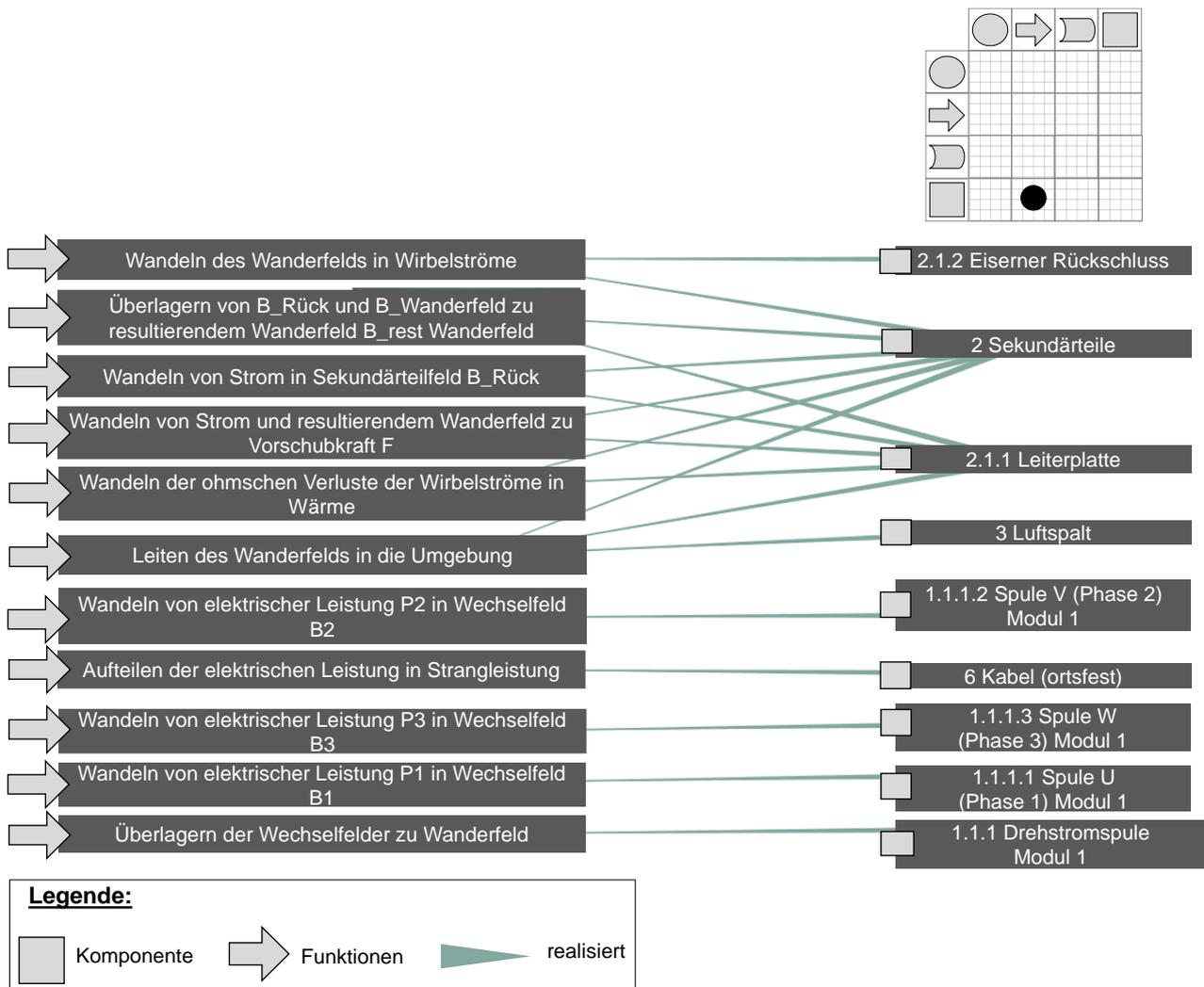


Abbildung 92: Komponenten und Funktionen des Langstator-Asynchron-Drehstromlinearantriebs (Prinzipdarstellung aus Loomeo [in Anlehnung an Riekhof und Willing 2013])